



**Miguel Golebiowski Leite de Sousa**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Avaliação da Integridade Estrutural de um Componente Utilizado na Indústria Ferroviária**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos  
Pereira Martins, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientador: Prof.<sup>a</sup> Doutora Teresa Leonor Ribeiro  
Cardoso Martins Morgado, Prof.<sup>a</sup> Adjunta, IPT

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Arguente: Prof. Doutor Luís Filipe Galvão dos Reis, Prof. Associado, IST-UNL

Vogal: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins, Prof. Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro de 2014**





**Miguel Golebiowski Leite de Sousa**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Avaliação da Integridade Estrutural de um Componente Utilizado na Indústria Ferroviária**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos  
Pereira Martins, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Doutora Teresa Leonor Ribeiro  
Cardoso Martins Morgado, Prof.<sup>a</sup> Adjunta, IPT

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Arguente: Prof. Doutor Luís Filipe Galvão dos Reis, Prof. Associado, IST-UNL

Vogal: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins, Prof. Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro de 2014**



# **Avaliação da Integridade Estrutural de um Componente Utilizado na Indústria Ferroviária**

Copyright © Miguel Golebiowski Leite de Sousa, Faculdade de Ciências e Tecnologia,  
Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

O meu profundo agradecimento a todos aqueles que de certa maneira contribuíram para a realização e conclusão deste trabalho, directa ou indirectamente, em especial:

Ao meu Orientador, Professor Rui Martins, agradeço a sua orientação neste trabalho, a paciência e disponibilidade de colaboração, a partilha de conhecimento e o incentivo nas alturas de menor motivação. Agradeço também o seu papel fundamental na revisão do trabalho.

À minha co-Orientadora, Professora Teresa Morgado, pela disponibilização de conhecimentos enriquecedores para o trabalho, pela ajuda no acesso às amostras de aço e no contacto com os responsáveis pelo equipamento de análise tomográfica fundamental na parte experimental do trabalho. Agradeço também a oportunidade concedida pela Professora Teresa de me proporcionar e de me acompanhar na visita à fundição FRASAM em Abrantes, que contribui-o com conhecimentos enriquecedores para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Manuel Pereira e ao Professor António Maurício, pela colaboração e pelo acesso ao equipamento de análise tomográfica do Laboratório de Mineralogia e Petrologia do IST (LAMPIST), com o qual foi feita a determinação pormenorizada da geometria tridimensional dos poros existentes numa amostra de material obtida através de fundição em molde de areia.

À Professora Virgínia Infante, pelo apoio dado durante a fase de desbaste com fresa das amostras de aço estudadas.

Aos técnicos de oficina do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, em especial ao Sr. João pelo apoio dado na preparação das amostras.

À minha família, especialmente aos meus pais, por todo o apoio e preocupação diária que demonstraram e pela força que me deram, durante toda a minha formação académica.





## Resumo

No âmbito da integridade estrutural de componentes ferroviários, o presente trabalho utiliza métodos de previsão de vida à fadiga para estimar a duração de um componente em aço vazado, obtido por fundição em areia, com a especificação ASTM A148 90-60. O objecto de estudo é um componente ferroviário que tem como principais funções acoplar os vagões entre si, assim como acoplar os vagões à respectiva locomotiva, e suportar os esforços axiais de compressão e de tracção decorrentes da utilização normal do material circulante, bem como suportar o impacto provocado pelo arranque e pela travagem da locomotiva.

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica, seguida de observação macroscópica e tomográfica de amostras de aço, com vista à obtenção de dados relevantes no que diz respeito às dimensões e formas das porosidades existentes no material. Posteriormente foram utilizadas curvas de propagação de defeitos,  $\frac{da}{dN}$  vs  $\Delta K$ , em regime II, considerando uma probabilidade de sobrevivência de 50%, com a finalidade de descobrir o efeito que os vários defeitos detectados tinham na vida à fadiga e na vida útil do componente.

A distribuição de tensões no componente original, como projectado, foi determinada por simulação numérica, através do Método dos Elementos Finitos, e comparada com os valores de tensão determinados, em estudo prévio, por intermédio da aplicação da técnica de extensometria. Simultaneamente, as porosidades medidas nas amostras de material foram introduzidas no modelo de elementos finitos. Posteriormente realizaram-se melhorias em termos de geometria do componente, com vista a reduzir o nível de tensões presentes na estrutura e aumentar a vida útil do componente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Integridade estrutural, Componente ferroviário, Aço vazado ASTM A148 90-60, Porosidades, Micro-tomografia, Previsão de vida à fadiga.



## Abstract

Within the structural integrity of railway components, the present thesis applies fatigue life prediction methods to estimate the fatigue life of a component with the purpose of preventing failure and estimate the real life time of a cast steel obtained by sand cast with the specifications ASTM A148 90-60. The object of study is a railway component that plays a role in coupling the wagons and to the locomotive, and withstand the axial forces of compression and tension arising from the normal use of the component, as well as supporting the impact caused by starting and braking the locomotive.

Initially a literature review was made, followed by macroscopic and tomographic observation of cast steel samples, with the goal of obtaining relevant data about the dimensions and shapes of existing pores in the material. Subsequently defect propagation curves were used,  $\frac{da}{dN}$  vs  $\Delta K$ , in regime II, considering a probability of survival of 50%, in order to find out the effects that the various defects found had in fatigue and residual life of the component.

The stress distribution in the original component, as designed, was analyzed by numerical simulation, using the finite element method, and compared with the values of a previous study that used strain gauges. Simultaneously, the porosities measured in the samples of the material were introduced into the finite elements. Improvements have been made in the component geometry, to reduce the stress levels and to increase the component life time

**KEYWORDS:** Structural Integrity, Railway Component, Cast Steel ASTM A148 90-60, Porosities, Micro-Tomography, Fatigue Life Prediction



# Índice Geral

Agradecimentos .....	iii
Resumo.....	v
Abstract .....	vii
Índice Geral.....	ix
Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas.....	xv
Abreviaturas e Siglas.....	xvii
Simbologia.....	xvii
<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objectivos.....	1
1.3 Estrutura do Trabalho.....	2
<b>Capítulo 2 - Pesquisa bibliográfica .....</b>	<b>3</b>
2.1-Introdução .....	3
2.2 – Defeitos em Fundição .....	3
2.3 – Aços Vazados .....	7
2.4 – Caracterização de Defeitos de Fundição .....	10
2.4.1 – Metodologias utilizadas na Caracterização de Defeitos.....	13
2.4.2 – Efeito dos defeitos na Concentração de Tensões .....	13
2.5 – Estudos em Componentes Ferroviários .....	16
<b>Capítulo 3 – Estudo Experimental .....</b>	<b>19</b>
3.1 Introdução.....	19
3.2 Amostras .....	19
3.3 Análise Óptica (2D) .....	20
3.4 Micro-Tomografia (3D) ( $\mu$ CT) .....	23
<b>Capítulo 4 – Mecânica da Fractura .....</b>	<b>29</b>
4.1 Introdução.....	29
4.2 Conceitos Gerais .....	29
4.2.1 Fadiga.....	29
4.2.2 Modos de Falha .....	30

4.2.3 Mecânica da Fractura Linear Elástica .....	31
4.2.4 Experimentação na Mecânica da Fractura .....	31
4.3 Previsão Crescimento de Fenda .....	31
4.3.1 Modelos de Previsão do Crescimento de Fenda .....	31
4.3.2 Ritmo de Crescimento .....	34
4.3.3 Cálculo do factor de intensidade de tensões .....	35
4.3.4 Previsão do limite de vida à Fadiga .....	37
<b>Capítulo 5 – Simulação Numérica .....</b>	<b>45</b>
5.1 Introdução.....	45
5.2 Caracterização da geometria em estudo .....	45
5.3 Escolha dos elementos .....	45
5.4 Condições de Fronteira .....	46
5.5 Resultados Obtidos na Análise de Tensões.....	47
5.6 Sugestão de melhoramento para a diminuição das tensões provocadas pelos esforços em serviço .....	49
5.7 Efeito das Porosidades na Concentração de Tensões .....	51
<b>Capítulo 6 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>53</b>
6.1 Conclusões .....	53
6.2 Propostas para Trabalhos Futuros .....	54
<b>Bibliografia .....</b>	<b>55</b>

# Índice de Figuras

## Capítulo 2

Figura 2.1 Etapas do processo de Fundição por Moldação em Areia. [10].....	4
Figura 2.2 Desempenho dos componentes como resultado da interacção entre a composição, processo, geometria e propriedades do material. [11] .....	4
Figura 2.3 Propriedades químicas e composição de alguns aços vazados [2] .....	8
Figura 2.4 Diagrama que ilustra as relações de irreversibilidade das propriedades mecânicas e físicas dos materiais. [11] .....	9
Figura 2.5 Projecção planar da distribuição dos poros reconstruídos em 3D e a correspondente fracção de superfície ao longo do eixo longitudinal para cada amostra [7]. ....	10
Figura 2.6 Zona de influência dos poros <i>versus</i> volume dos poros para as 5 amostras. [7] .....	11
Figura 2.7 Reconstrução dos poros através de $\mu$ CT. A esquerda encontra-se o poro e à direita o provocado pelo encolhimento do metal no arrefecimento. [8] .....	13
Figura 2.8 (a) Malha da superfície do poro e localização do sistema de coordenadas, o eixo y é paralelo ao carregamento. [7].....	13
Figura 2.9 Distribuição da concentração de tensões para diferentes orientações. [8] .....	14
Figura 2.10 Exemplo da malha criada [7] .....	14
Figura 2.11 Output dos resultados obtidos pelos MEF [7].....	15
Figura 2.13 Modelo de EF onde estão representadas as condições de fronteira e a direcção do carregamento, poro com a maior concentração de tensões e distribuição de tensões desse mesmo poro. [9].....	16
Figura 2.14 Engate automático SA-3. [6].....	16

## Capítulo 3

Figura 3.1 Exemplar da peça fundida devidamente seccionada. ....	19
Figura 3.2 Acabamento superficial dos provetes seccionados: antes (esquerda) e depois da utilização da fresadora (direita).....	20
Figura 3.3 Operação de desbaste efectuado na fresadora. ....	20
Figura 3.4 Microscópio óptico NIKON.....	20
Figura 3.5 Exemplo de medição da área de um poro e diâmetro máximo de Feret ( a vermelho).....	21
Figura 3.6 <i>Objective Micrometer</i> marca Struers.....	21
Figura 3.7 Conversão medida real vs. medições no programa <i>SolidWorks</i> .....	22
Figura 3.10. Corte da amostra 10 em tiras para observação através de micro-tomografia. ....	24

Figura 3.11. Amostra final a direita, amostra colocada para observação tomográfica a esquerda.....	24
Figura 3.12. Micro-tomógrafo Skyscan 1172 .....	25
Figura 3.13. Radiografia com sobreposição do espectro para localizações de poros ao longo da linha vermelha. ....	25
Figura 3.14. Reconstrução tomográfica em perspectiva com corte ao longo do plano xy e yz.....	26
Figura 3.15. Poros encontrados na amostra sujeita a tomografia reconstruídos em <i>SolidWorks</i> .....	26

#### **Capítulo 4**

Figura 4.1 Superfície fracturada por fadiga.[17].....	30
Figura 4.2 Modos de Deformação. [17] .....	30
Figura 4.3 Limites de aplicação da Lei de Paris. [17].....	32
Figura 4.4 Curva de propagação no regime II para fiabilidade de 5%, 10%, 50%, 90% e 95%.[1] .....	33
Figura 4.5 Etapas de Crescimento de Fenda. [17].....	34
Figura 4.6 Diagrama de Tensões Equivalentes vs Número de Ciclos de Fadiga Acumulados. ....	38
Figura 4.7 Geometria para defeitos interiores. [18].....	38
Figura 4.8 Geometria para defeitos à superfície. [18] .....	39
Figura 4.9. Geometria para defeitos coplanares à superfície defeitos e interiores [18] .....	39
Figura 4.10. Geometria para defeitos coplanares interiores [18] .....	39
Figura 4.11 Medidas reais do “engate” em mm e posição da roseta 6 (zona crítica) a vermelho.....	40
Figura 4.12 Poro A (Observação óptica). ....	40
Figura 4.13 Poro B (Observação óptica). ....	40
Figura 4.14 Poro E (Observação Óptica) .....	41
Figura 4.15. Poro CD (Observação tomográfica).....	41
Figura 4.16. Propagação do tamanho, $a$ , dos poros “A, B, E”, ao longo de um dia assumindo que todos os patamares de carregamento induzem $\Delta K$ superior a 4.7 MPa m (valor limiar de propagação) .....	41
Figura 4.17. Propagação do tamanho, $a$ , do poro “CD” ao longo de um dia assumindo que todos os patamares de carregamento induzem $\Delta K$ superior a 4.7 MPa m. (valor limiar de propagação).....	42
Figura 4.18. Evolução do $\Delta K$ ao longo dos diferentes patamares de carregamento para as diferentes dimensões dos poros.....	42
Figura 4.19. Propagação do comprimento de fenda para poro CD assumindo que ambos estão à superfície do componente.....	43



Figura 4.20. Propagação do comprimento de fenda para poro CD assumindo que ambos estão no interior do componente. ....	43
--	----

## **Capítulo 5**

Figura 5.1 Desenhos 3D do “engate”. ....	46
Figura 5.2. Esquema das condições fronteira e de carregamento. ....	47
Figura 5.3. Distribuição das tensões de Von Mises no programa <i>ANSYS Workbench</i> . ....	48
Figura 5.4. Distribuição das tensões de Von Mises no programa <i>SolidWorks Simulation</i> . ....	48
Figura 5.5. Desenhos 3D do “engate” melhorado. ....	49
Figura 5.6. Distribuição das tensões de Von Mises para “engate” melhorado no ANSYS Workbench .....	50
Figura 5.7. Distribuição das tensões de Von Mises para engate melhorado no SolidWorks Simulation .....	50
Figura 5.8. Ilustração das localizações dos poros para simulação numérica.....	51
Figura 5.9. Corte transversal do componente evidenciando localização dos poros. ....	52



# Índice de Tabelas

## **Capítulo 2**

Tabela 2.1 Estimativa dos maiores tamanhos para os poros e resistência a fadiga para amostras de AISi7Mg. [8].....	12
--	----

## **Capítulo 4**

Tabela 4.1. Comprimento, largura e factor de forma de cada poro. (medidas em mm).....	41
Tabela 4.2. Previsão de vida à fadiga, em meses, para poro CD admitindo o defeito como superficial e embebido. ....	44

## **Capítulo 5**

Tabela 5.1. Resultado das tensões de Von Mises no ponto onde ocorreu a fissuração, para os dois programas de simulação, e comparação o valor experimental determinado em [1].....	49
---	----



## Abreviaturas e Siglas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ICFTA – *International Committee of Foundry Technical Associations*

SAE – *Society of Automotive Engineers*

3D – Três dimensões

2D – Duas dimensões

EVS – *Extreme Value Statistics*

CT – *Computed Tomography*

$\mu$ CT – *Micro Computed Tomography*

MEF – Método dos Elementos Finitos

EF – Elementos Finitos

MFLE – Mecânica da Fractura Linear Elástica

PC – *Personal Computer*

## Simbologia

$a$  – Valor da profundidade do defeito superficial ou equivalente a metade da largura para defeitos interiores

$a_c$  – Dimensão crítica de defeito

$a_f$  – Tamanho final de defeito

$a_i$  – Dimensão inicial de defeito

$B$  – Espessura do componente no plano de propagação do defeito

$c$  – Metade do comprimento para defeitos à superfície e interiores

$C$  – Constante da Lei de Paris

$da/dN$  – Velocidade de crescimento de uma fenda

$f_\theta, f_w, g$  – Coeficientes de correcção do factor de intensidade de tensões

$K$  – Factor de intensidade de tensões

$\Delta K$  – Gama do factor de intensidade de tensões

$K_c, K_{IC}$  – Tenacidade e tenacidade à fractura

$K_m$  – Factor de concentração de tensões devido ao desalinhamento

$K_t$  – Factor de concentração de tensões

$K_{tm}, K_{tb}$  – Factor de concentração de tensões aplicado às tensões de membrana e de flexão

$\Delta K_{th}$  – Valor limiar da gama do factor de intensidade de tensões para propagação de defeitos

$M_m, M_b, M_{km}, M_{kb}$  – Factores de ampliação do factor de intensidade de tensões

$m$  – Expoente da Lei de Paris

$N$  – Número de ciclos à fadiga

$N_i, N_f$  – Ciclos de Fadiga inicial e final

R – Razão entre tensões de carregamento

W – Largura no plano do defeito

Y – Factor de correcção do factor de intensidade de tensões

$\sigma_a$  – Gama de tensões nominais

$\Delta\sigma_b$  – Gama de tensão devida a esforços de flexão

$\Delta\sigma_m$  – Gama de tensão devida a esforços de membrana

$\sigma_m$  – Tensão média

$\sigma_{max}, \sigma_{min}$  – Valores máximos e mínimos das tensões nominais, respectivamente

$\phi$  - Integral elíptico

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Enquadramento

Com esta dissertação pretende-se dar seguimento ao estudo, realizado no âmbito da avaliação da integridade estrutural e da previsão de vida à fadiga, de um componente ferroviário [1].

O objecto de estudo é um componente ferroviário, também denominado na gíria como “engate”, que tem como principais funções acoplar os vagões entre si, assim como acoplar os mesmos à respectiva locomotiva, suportando os esforços axiais de compressão e de tracção decorrentes da utilização normal do material circulante, bem como suportar o impacto provocado pelo arranque e pela travagem da locomotiva.

A durabilidade e a integridade estrutural de um componente mecânico são afectadas por [2]:

- solicitações em serviço;
- propriedades mecânicas do material;
- geometria do componente;
- processo de fabrico.

O componente ferroviário em estudo “engate”, obtido através do processo de fundição em molde de areia, é fabricado num aço vazado, com a especificação ASTM A148 90-60 [3], com tratamento térmico não especificado. Problemas de fissuração prematura, em peças que foram aceites nos testes de controlo de qualidade exigidos no sector ferroviário [4], e que não foram sujeitas a condições de carregamento em serviço superiores às de projecto durante a sua vida útil, nomeadamente as tensões máximas em serviço, levam a crer que existem defeitos internos no componente, inerentes ao processo de fundição, que não são contabilizados no controlo de qualidade e que produzem um efeito negativo nas propriedades mecânicas e, consequentemente, no tempo de vida útil do componente.

## 1.2 Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso procurando aprofundá-los na área do Projecto Mecânico. Mais especificamente, o presente estudo tem como objectivos principais a realização das seguintes tarefas:

- Observação com microscópio óptico e observação com recurso a raio X, mais precisamente  $\mu$ CT, para fazer análise a três dimensões dos defeitos de fabrico (porosidade) inerentes ao processo de fabrico (fundição).

- Tratamento estatístico dos dados relativos à geometria e tamanhos dos defeitos de fundição observados nas amostras.
- Estudo da influência dos defeitos de fundição na integridade estrutural de componente, mais precisamente na vida à fadiga e na concentração de tensões.
- Análise, pelo método dos elementos finitos, do componente sob estudo, com o propósito de estudar a distribuição das tensões/deformações e de propor novas soluções de projecto, de modo a diminuir as tensões induzidas no componente.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos.

No primeiro capítulo é apresentado o tema, bem como os objectivos propostos e a estrutura do documento.

No segundo capítulo é feita uma pesquisa bibliográfica com o propósito de elucidar o leitor sobre os diferentes tipos de defeitos resultantes da fundição e de como estes defeitos podem ser prejudiciais para a integridade estrutural de um componente. É abordada a importância da composição química nas propriedades mecânicas finais e a dificuldade de controlar o processo de fundição para obter fundições livres de defeitos. São também apresentados artigos que demonstram os efeitos das porosidades, mais concretamente como é que as suas diferentes geometrias e as suas distribuições influenciam componentes vazados de diversas ligas na concentração de tensões.

No terceiro capítulo é apresentado o trabalho de preparação das amostras para observação óptica e tomográfica e os seus resultados.

No capítulo quatro são apresentados os conceitos gerais de Mecânica da Fractura e de fadiga. Para além do referido, com base nas curvas  $\frac{da}{dN}$  vs  $\Delta K$  para o regime II, e tendo em conta uma probabilidade de sobrevivência de 50% para as diferentes formas e tamanhos das porosidades, foi escrito um programa informático em MATLAB para fazer a previsão de vida à fadiga.

O quinto capítulo diz respeito à análise pelo MEF do “engate”, sem e com porosidades, onde se estudam as tensões/deformações e se propõem novas soluções de projecto. Neste capítulo é feita uma comparação de resultados entre dois programas de simulação numérica, *SolidWorks Simulation* e *ANSYS Workbench*.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões da investigação, bem como propostas para trabalhos futuros.



## **Capítulo 2 - Pesquisa bibliográfica**

### **2.1-Introdução**

Desde a revolução industrial, e com o aparecimento de novas formas de produção, o avanço tecnológico nos sistemas de transporte não tem parado, visto que estes facilitam as trocas comerciais e o crescimento económico das regiões. Neste contexto, o transporte ferroviário assume um papel de grande relevância, uma vez que é um meio de transporte com elevada capacidade de carga e energeticamente eficiente para longas distâncias quando comparado com o transporte rodoviário e marítimo [5].

Devido à importância que este meio de transporte continua a ter no transporte de mercadorias e devido ao mercado cada vez mais competitivo, têm sido realizados estudos [1][6][7][8][9] em diversos componentes metálicos vazados - locomotivas, cabeças de motores, pistões, vagões, engates entre outros - com o propósito de prevenir e explicar o porquê da ocorrência de fissuração, ou até de roturas completas dos componentes, antes do tempo previsto nos cálculos de Projecto Mecânico.

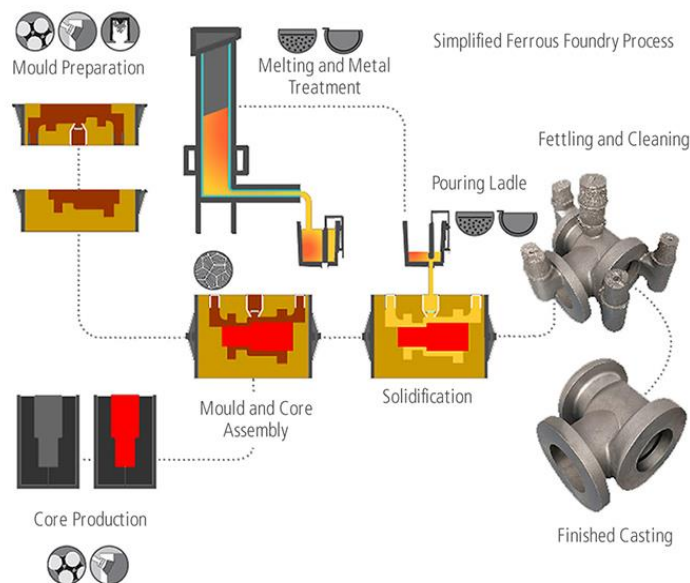
Procurar-se-á fazer na secção seguinte uma descrição dos estudos realizados no âmbito da falha deste tipo de componentes, bem como fazer a caracterização dos defeitos de fabrico de peças inerentes ao processo de fundição.

### **2.2 – Defeitos em Fundição**

Uma vez que um dos principais objectivos desta dissertação é a caracterização de defeitos de fundição e a respectiva quantificação destes na causa da falha de um componente ferroviário, uma explicação sobre o processo, bem como o tipo de defeitos mais comuns encontrados é de grande relevância para se perceber com mais detalhe o trabalho desenvolvido nos capítulos seguintes.

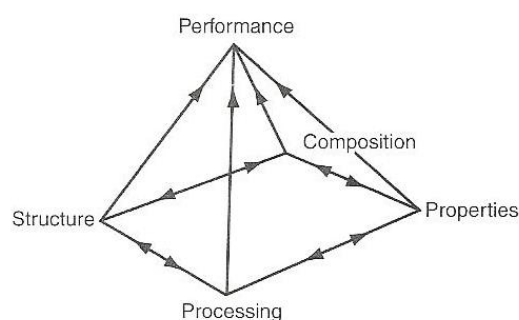
O processo de fundição consiste na enformação de ligas metálicas, no estado líquido, seguido de uma solidificação controlada. A Figura 2.1 representa um esquema das várias etapas deste processo.

Com o propósito de perceber a complexidade do processo de fundição, e a dificuldade no seu controlo, foi realizada uma visita a FRASAM, empresa de fundição situada em Abrantes, onde se pôde concluir a dificuldade no controlo das várias variáveis, como por exemplo, o processo de vazamento e de como este pode influenciar as especificações finais do produto.



**Figura 2.1 Etapas do processo de Fundição por Moldação em Areia. [10]**

Na análise de falha de componentes vazados é fundamental estabelecer o que aconteceu antes e na altura da falha. Normalmente estas falhas podem advir de uma geometria e/ou selecção de material incorrectos, de erros no fabrico, mais precisamente de erros no processo de fundição, ou uma combinação destes (Fig. 2.2). Estes erros podem ser prevenidos, ou pelo menos minorados, se houver uma boa colaboração entre o grupo de engenheiros responsáveis pelo projecto e o grupo responsável pela fundição do componente, uma vez que é através do conhecimento adquirido ao longo do tempo pelos engenheiros de fundição que estes podem contribuir com informação útil sobre o que pode realmente ser produzido por fundição, tanto em termos de geometria das peças como na selecção do material correcto.



**Figura 2.2 Desempenho dos componentes como resultado da interacção entre a composição, processo, geometria e propriedades do material. [11]**

A fim de evitar que existam diferentes nomenclaturas para o mesmo tipo de defeitos encontrados em fundição, o ICFTA padronizou uma nomenclatura identificando sete categorias básicas:

- Deformações localizadas
- Cavidades
- Fissuras
- Fundição incompleta
- Dimensão incorrecta
- Inclusões ou anomalias estruturais

Estes defeitos podem ocorrer em ferros e aços vazados e podem levar à rejeição do componente após inspecção. A existência de defeitos, por si só, não garante que o desempenho da peça fundida vá ser menor, visto que o seu efeito depende fortemente do tamanho, distribuição e localização dos mesmos. Pequenos defeitos, situados no centro da peça, não produzem grande efeito, mas se, por sua vez, estes estiverem situados junto à superfície da peça são normalmente prejudiciais. No que toca à distribuição de defeitos, imperfeições com distribuições regulares têm um maior efeito do que as imperfeições distribuídas aleatoriamente [11].

No caso em estudo, o componente ferroviário engate é produzido por molde de areia e os defeitos mais comuns são:

- Porosidades
- Inclusões
- Óxidos
- Fissuração a quente
- Defeitos Superficiais

Os poros são um defeito comum em fundição, podem aparecer de diversas formas, e ser detectados em diferentes localizações da peça. No que toca à sua classificação, os poros podem ser classificados como macroporosidades, isto é, poros que são grandes o suficiente para ser detectados a olho nú através de inspecção radiográfica, ou microporosidades, referente a poros que não são visíveis sem recurso a grande ampliação.

Tanto as macroporosidades com as microporosidades são causadas pela acção combinada do processo de solidificação do metal e a forma como os gases saem para o exterior do metal fundido durante a solidificação. O método mais eficaz para a sua eliminação é o de aumentar o gradiente térmico, alcançado na maioria das vezes pelo aumento da taxa de solidificação. [11] O problema desta técnica é o de estar limitada à liga usada, às propriedades térmicas do molde e à geometria do componente, dando novamente ênfase à importância da cooperação entre os responsáveis pela fundição e os responsáveis pelo projecto.

Se as microporosidades forem menores do que 0,2 mm em comprimento, o seu efeito nas propriedades dinâmicas é muito reduzido ou inexistente, uma vez que as propriedades à fadiga em componentes vazados com poros com este tamanho ou menores, verificaram-se ser as mesmas que em componentes vazados sem este tipo de defeitos [11]. A forma dos poros é

também um factor de grande importância, uma vez que poros planares têm um efeito mais negativo do que poros com forma esférica.

Para as macroporosidades, as propriedades estáticas são reduzidas pelo menos da porção de área transversal ocupada pelo poro, uma vez que não existe metal no seu interior capaz de suportar as forças exercidas; outra consequência é o facto de este tipo de defeitos também causar concentração de tensões locais no material existente na proximidade da macroporosidade, o que leva facilmente à nucleação e propagação de fendas por fadiga.

*As Inclusões* são não-metálicas e por vezes de fases intermetálicas, que estão embebidas na matriz metálica. Existem essencialmente dois tipos de inclusões [11]:

- Exógenas: Provocadas por causas externas.
- Endógenas: Aquelas que são inatas ou inerentes ao processo de fusão do metal

As inclusões exógenas são essencialmente óxidos ou misturas de óxidos e são principalmente escória ou partículas de escória, as quais são os óxidos que resultam da reacção do metal com o oxigénio no ar durante o vazamento.

As inclusões endógenas incluem sulfuretos, nitretos, e óxidos derivados da reacção química do metal fundido com o ambiente. Estas inclusões, contrariamente às inclusões exógenas, são de pequena dimensão, requerem ampliação para serem identificadas e localizam-se normalmente nas últimas regiões a solidificar. Por isso são tipicamente interdendríticas no que diz respeito à sua forma. Compostos como fosforetos e sulfuretos são prejudiciais para as propriedades mecânicas do material, a não ser que sejam mantidos em valores mínimos; por exemplo, a presença de inclusões de tipo sulfuretos é prejudicial para a ductilidade do aço vazado e aumenta a probabilidade de fissuração a quente. O controlo deste tipo de inclusões requer portanto um conhecimento da sua origem, bem como do processo químico envolvido, nomeadamente da composição química do material vazado.

*Os filmes de óxidos* são similares a uma inclusão e estão relacionados com as características de vazamento. São portanto uma descontinuidade linear/planar e uma região bastante provável para a ocorrência de nucleação e propagação de fendas conduzindo por vezes à sua fractura. Estes formam-se à superfície do metal fundido à medida que este é vazado para o molde e a sua formação pode ser minorada através da promoção do vazamento do metal por baixo do molde e de maneira controlada.

*Fissuração a quente* é definida como uma fissura ou fenda causada pelas tensões internas desenvolvidas na solidificação e durante o arrefecimento, numa parte do material que se encontra em solidificação.

Este tipo de defeito deve ser descoberto no processo de inspecção e pode ser minimizado pela escolha adequada da composição do metal, melhoria do traçado da peça, correcção do sistema de giteamento e alimentação bem como pela diminuição da temperatura de vazamento.

*Defeitos Superficiais* podem aparecer como picadas, fissuração a quente, porosidades e inclusões. Uma descontinuidade superficial por si só não tem grande probabilidade de diminuir

a vida em serviço de um determinado componente, a não ser que esta tenha um tamanho considerável e esteja localizada numa zona de concentração de tensões. Os tipos de descontinuidades mais perigosas são os de geometria planar, que geram pontos de elevada concentração de tensões.

## **2.3 – Aços Vazados**

Como já referido acima, a geometria do componente a fabricar é de extrema importância para o processo de fundição e tem grandes consequências quanto ao tipo e quantidade dos defeitos encontrados. Outro aspecto de grande importância é a escolha do material que é fundamental para minimizar o risco de falha e assegurar o correcto funcionamento de componentes mecânicos [11]. A escolha do material está directamente ligada ao tipo de aplicação propriamente dita do componente e para tal uma das considerações mais comuns é a determinação das propriedades mecânicas adequadas. Nos metais, algumas das propriedades que devem ser tidas em conta para assegurar o bom funcionamento dos componentes, tanto como para prevenir a ocorrência de falhas são [11]:

- Tensão de cedência
- Tensão de rotura
- Módulo de elasticidade
- Ductilidade
- Resistência à fadiga
- Resistência à fractura
- Dureza
- Coeficiente de atrito
- Tenacidade
- Resiliência
- Resistência à corrosão
- Densidade
- Coeficiente de expansão térmica
- Condutividade térmica
- Resistência eléctrica
- Outras propriedades físicas

No caso desta dissertação, o material utilizado para a produção do componente a estudar é um aço de médio teor em carbono, de baixa, liga designado ‘ao manganês’: ASTM A148 90-60. Um aço é uma liga de ferro e carbono, a que são adicionados outros elementos em pequenas quantidades, tais como: manganês, silício, fósforo, e enxofre. Estes elementos

desempenham um papel fundamental na desoxidação do metal durante o processo de fundição e costumam estar compreendidos entre dos seguintes intervalos [2]:

- Manganês, 0.5 – 1.0 %
- Silício, 0.25 – 0.8 %
- Fósforo, 0.05 % máx
- Enxofre, 0.06 % máx

Os aços vazados são normalmente produzidos/comprados para satisfazer determinadas propriedades mecânicas com algumas restrições ao nível da sua composição química, uma vez que se podem obter uma grande variedade de propriedades nos aços devido à variação da composição e do tratamento térmico. Existem então várias especificações da ASTM e da SAE J435c, por exemplo, onde se podem encontrar as propriedades e as composições químicas normalizadas. Na figura 2.3 estão indicados alguns desses requerimentos dados para diferentes especificações da ASTM e da SAEJ435c [2].

Table 1 Summary of specification requirements for various carbon steel castings.

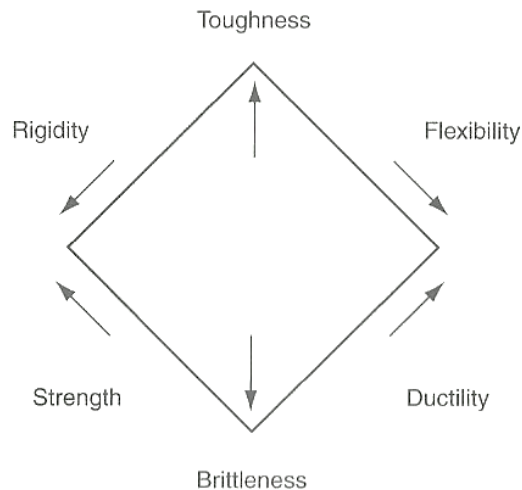
Unless otherwise noted, all the grades listed in this table are restricted to a phosphorus content of 0.040% max and a sulfur content of 0.045% max.

Class or grade	Tensile strength(a)		Yield strength(a)		Minimum elongation in 50 mm (2 in.), %	Minimum reduction in area, %	Chemical composition(b), %			S, P	Other requirements	Condition or specific application
	MPa	ksi	MPa	ksi			C	Mn	Si			
ASTM A 27: carbon steel castings for general applications												
N-1	---	---	---	---	---	---	0.25(c)	0.75(c)	0.80	0.06% S, 0.05% P	Chemical analysis only	
N-2	---	---	---	---	---	---	0.35(c)	0.60(c)	0.80	0.06% S, 0.05% P	Heat treated but not mechanically tested	
U60-30	415	60	205	30	22	30	0.25(c)	0.75(c)	0.80	0.06% S, 0.05% P	Mechanically tested but not heat treated	
60-30	415	60	205	30	24	35	0.30(c)	0.60(c)	0.80	0.06% S, 0.05% P	Heat treated and mechanically tested	
65-35	450	65	240	35	24	35	0.30(c)	0.70(c)	0.80	0.06% S, 0.05% P	Heat treated and mechanically tested	
70-36	485	70	250	36	22	30	0.35(c)	0.70(c)	0.80	0.06% S, 0.05% P	Heat treated and mechanically tested	
70-40	485	70	275	40	22	30	0.25(c)	1.20(c)	0.80	0.06% S, 0.05% P	Heat treated and mechanically tested	
ASTM A 148: carbon steel castings for structural applications(d)												
40-40	550	80	275	40	18	30	(e)	(e)	(e)	0.06% S, 0.05% P	Composition and heat treatment necessary to achieve specified mechanical properties	
80-50	550	80	345	50	22	35	(e)	(e)	(e)	0.06% S, 0.05% P	Composition and heat treatment necessary to achieve specified mechanical properties	
90-60	620	90	415	60	20	40	(e)	(e)	(e)	0.06% S, 0.05% P	Composition and heat treatment necessary to achieve specified mechanical properties	
105-85	725	105	585	85	17	35	(e)	(e)	(e)	0.06% S, 0.05% P	Composition and heat treatment necessary to achieve specified mechanical properties	
SAE J435c: see Table 2 for alloy steel castings specified in SAE J435c												
0022	---	---	---	---	---	---	0.12-0.22	0.50-0.90	0.60	187 HB max	Low-carbon steel suitable for carburizing	
0025	415	60	207	30	22	30	0.25(c)	0.75(c)	0.80	187 HB max	Carbon steel welding grade	
0030	450	65	241	35	24	35	0.30(c)	0.70(c)	0.80	131-187 HB	Carbon steel welding grade	
0050A	585	85	310	45	16	24	0.40-0.50	0.50-0.90	0.80	170-229 HB	Carbon steel medium-strength grade	
0050B	690	100	485	70	10	15	0.40-0.50	0.50-0.90	0.80	207-255 HB	Carbon steel medium-strength grade	
080	550	80	345	50	22	35	---	---	---	163-207 HB	Medium-strength low-alloy steel	
090	620	90	415	60	20	40	---	---	---	187-241 HB	Medium-strength low-alloy steel	
H.A., HB, HC(f)	---	---	---	---	---	---	0.25-0.34	(f)	(f)	See Fig. 2.	Hardenability grades (Fig. 2)	
ASTM A 216: carbon steel castings suitable for fusion welding and high-temperature service												
WCA	415-585	60-85	205	30	24	35	0.25	0.70(c)	0.60	(g)	Pressure-containing parts	
WCB	485-655	70-95	250	36	22	35	0.30	1.00(c)	0.60	(g)	Pressure-containing parts	
WCC	485-655	70-95	275	40	22	35	0.25	1.20(c)	0.50	(g)	Pressure-containing parts	
Other ASTM cast steel specifications with carbon steel grades(h)												
A 352-LCA	415-585	60-85	205	30	24	35	0.25	0.70(c)	0.60	(g)(i)(j)	Low-temperature applications	
A 352-LCB	450-620	65-90	240	35	24	35	0.30	1.00	0.60	(g)(j)(k)	Low-temperature applications	
A 356-grade 1	485	70	250	36	20	35	0.35	0.70(c)	0.60	0.035% P max, 0.030% S max	Castings for valve chests, throttle valves, and other heavy-walled components for steam turbines	
A 757-A1Q	450	65	240	35	24	35	0.30	1.00	0.60	(j)(k)(l)	Castings for pressure-containing applications at low temperatures	

(a) Where a single value is shown, it is a minimum. (b) Where a single value is shown, it is a maximum. (c) For each reduction of 0.01% C below the maximum specified, an increase of 0.04% Mn above the maximum specified is permitted up to the maximums given in the applicable ASTM specifications. (d) Grades may also include low-alloy steels; see Table 2 for the stronger grades of ASTM A 148. (e) Unless specified by purchaser, the compositions of cast steels in ASTM A 148 are selected by the producer in order to achieve the specified mechanical properties. (f) Purchased on the basis of hardenability, with manganese and other elements added as required. (g) Specified residual elements include 0.30% Cu max, 0.50% Ni max, 0.50% Cr max, 0.20% Mo max, and 0.03% V max, with the total residual elements not exceeding 1.00%. (h) These ASTM specifications also include alloy steel castings for the general type of applications listed in the Table. (i) Testing temperature of -32 °C (-25 °F). (j) Charpy V-notch impact testing at the specified test temperature with an energy value of 18 J (13 ft · lb) min for two specimens and an average of three. (k) Testing temperature of -46 °C (-50 °F). (l) Specified residual elements of 0.03% V, 0.50% Cu, 0.50% Ni, 0.40% Cr, and 0.25% Mo, with total amount not exceeding 1.00%. Sulfur and phosphorus content, each 0.025% max.

Figura 2.3 Propriedades químicas e composição de alguns aços vazados [2]

É importante perceber quais as relações entre as propriedades mecânicas e quais os seus efeitos; por exemplo, que uma maior resistência mecânica leva frequentemente a uma menor ductilidade. Na Figura 2.4 encontra-se um diagrama que mostra como as propriedades do material estão interligadas e como existe uma relação de irreversibilidade entre as mesmas.



**Figura 2.4 Diagrama que ilustra as relações de irreversibilidade das propriedades mecânicas e físicas dos materiais. [11]**

No que toca a sua classificação, os aços vazados são classificados de acordo com o seu conteúdo de carbono [2]:

- Aços com baixo teor em carbono: 0.20% C ou menos
- Aços com teor médio em carbono: 0.20 – 0.50 % C
- Aços com alto teor em carbono: 0.5 % C ou mais

O carbono é portanto o principal factor de influência nas propriedades mecânicas destes aços.

No que diz respeito à composição química, muitos dos problemas encontrados devem-se a desvios na composição química do componente. Os erros na composição química podem ocorrer de três maneiras: a primeira tem a ver com a incorrecta escolha da composição face as solicitações que a peça irá encontrar durante a sua vida útil; a segunda diz respeito a erros no processo de fabrico, que levam a que a peça produzida apresente desvios na sua composição, os mais graves dão-se devido a desvios no conteúdo de carbono, mas as dificuldades no controlo da composição da peça produzida pode ocorrer também devido a outros elementos tais como níquel, cromo ou manganês. Por fim oligoelementos tais como, arsénio, estanho, antimónio, oxigénio, enxofre e hidrogénio, que não fazem parte da maior parte das especificações, podem conduzir a falhas inesperadas. O enxofre, por exemplo, é utilizado para melhorar a maquinabilidade do aço, mas afecta a sua ductilidade e resistência ao impacto. No



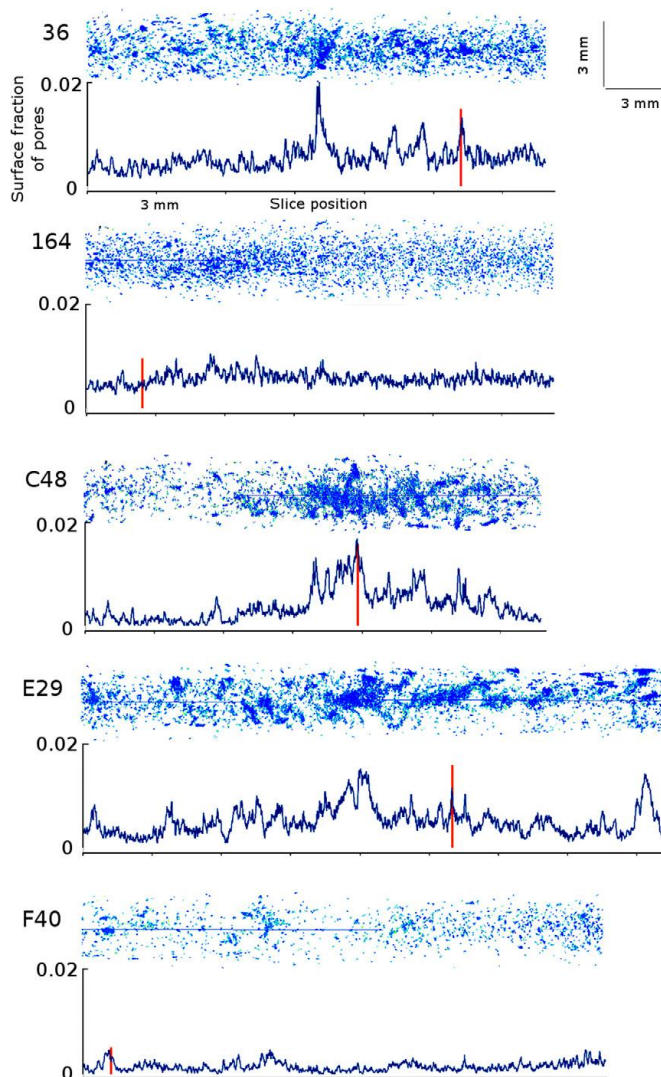
que toca aos oligoelementos como o arsénio, estanho ou antimónio pouco é conhecido sobre os seus efeitos em peças fundidas, existe apenas um consenso no que toca a sua concentração, que deve ser baixa, isto é, 0,005% ou menos, para minimizar falhas devido à degradação por impacto em aços de alta resistência com tratamento térmico.

## 2.4 – Caracterização de Defeitos de Fundição

Na presente dissertação pretende-se perceber como os defeitos de fundição, mais precisamente as porosidades, podem contribuir para um aumento da concentração de tensões junto das mesmas, bem como a sua influência na iniciação de fissuras de componentes mecânicos vazados. Estudos anteriores sobre o efeito destes defeitos atribuem como factores determinantes para a fissuração através de fadiga e um aumento da concentração de tensões, a distribuição espacial e estatística dos mesmos.

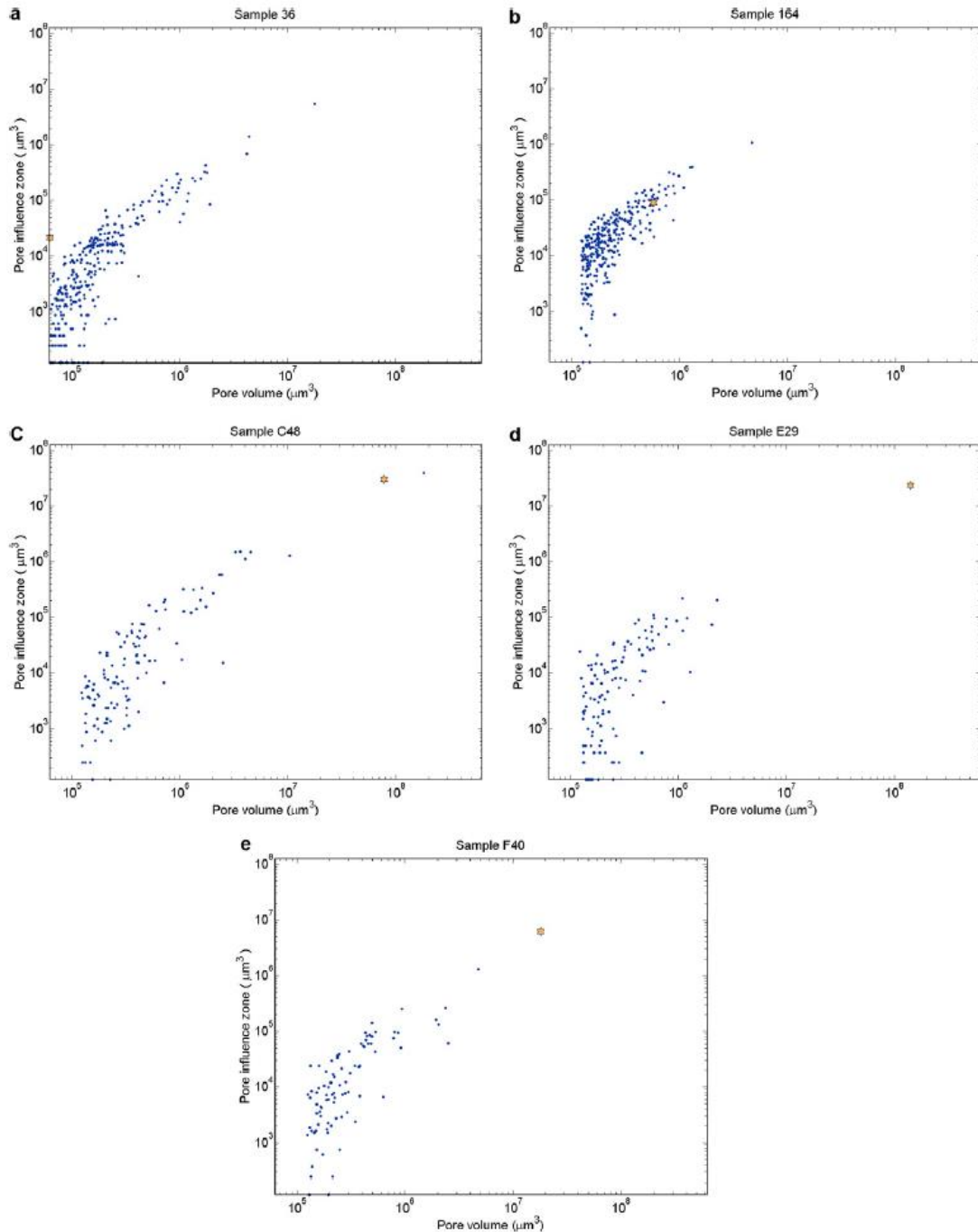
Num estudo [7] realizado para tentar perceber qual o efeito negativo das porosidades numa liga de alumínio vazado AlSi9Cu3, foram seguidas duas abordagens: a primeira consistiu na determinação da correlação entre a morfologia de cada poro e a dimensão da sua zona de influência, designada neste estudo como análise poro por poro; a segunda abordagem consistiu numa investigação à correlação entre a fracção local dos poros, analisados a partir das faces de amostras cortadas transversalmente, e a quantidade de zonas de influência em cada amostra designada no estudo como análise fatia a fatia.

Através da análise estatística dos resultados, obtiveram-se os gráficos representados pela Figura 2.5; para cada amostra, estes gráficos mostram a distribuição espacial dos poros ao longo da superfície da amostra, sendo que a zona de iniciação da fissura está marcada a vermelho e, em todas as amostras, a fissuração teve origem num poro.



**Figura 2.5** Projectão planar da distribuição dos poros reconstruídos em 3D e a correspondente fracção de superfície ao longo do eixo longitudinal para cada amostra [7].





**Figura 2.6 Zona de influência dos poros *versus* volume dos poros para as 5 amostras. [7]**

Como já referido os poros são caracterizados usando várias quantidades geométricas; as mais usadas são a área projectada num plano perpendicular ao eixo onde ocorrem as solicitações, e a distância mínima a superfície.

A forma dos poros tem também grande influência na concentração de tensões e é quantificada pela esfericidade, esfericidade esta que é igual a um para uma esfera perfeita, e tende para zero à medida que a esfericidade diminui. Foi também observado que os

parâmetros descritos acima - área projectada, distância à superfície e esfericidade - estão correlacionados com o volume, o que justifica o facto de o volume ser considerado como um parâmetro empírico para estimar a aceitabilidade ou a não aceitabilidade de um poro [7]. A Figura 2.6 mostra a zona de influência dos poros *versus* volume dos poros. Como esperado, quanto maior o volume de um poro, maior a concentração de tensões. Pode-se também constatar que a fissura começa nos poros de maiores dimensões, excepto para a amostra 36 onde a fissura começou num poro pequeno, mas localizado à superfície da amostra.

Os resultados apesar de não serem representativos, uma vez que a dimensão da amostra era de apenas 5, evidenciaram a importância da distribuição dos tamanhos dos poros, bem como a distribuição espacial para a iniciação da fissura. No geral, esta metodologia permite identificar as zonas de maior probabilidade de ocorrência de falha à fadiga.

Dada a importância do tamanho dos poros na determinação da vida à fadiga, uma vez que quanto maior é o defeito menor é a resistência à fadiga, qualquer tolerância de projecto para defeitos deste tipo deverá ser baseada num método que consiga estimar o maior defeito na distribuição encontrada. Para tal, no estudo [8] realizou-se uma análise metalográfica que permitiu indicar que o tamanho do poro é perfeitamente descrito pelo parâmetro  $(Área)^{\frac{1}{2}}$  onde a área representa o tamanho do maior poro encontrado durante a inspecção.

Contudo os resultados obtidos no estudo [8], presentes na Tabela 2.1, contradisseram a correlação esperada entre o tamanho dos poros e a vida à fadiga, uma vez que as quatro amostras testadas demonstraram ter uma resistência à fadiga comparável para  $10^7$  ciclos sendo os tamanhos dos poros no entanto, bem diferentes; assim sendo foi utilizado um novo parâmetro para descrever o tamanho do poro: o diâmetro máximo de Feret, na Tabela 2.1 podemos observar que o conjunto de amostra C e D é apenas 1.3 vezes maior do que o conjunto de amostras A e B, embora não se possa correlacionar este valores com os resultados de resistência à fadiga, a maior proporção de tamanho dos poros é agora consideravelmente mais reduzida (1.3 vs 2.15 comparativamente ao parâmetro  $(Área)^{\frac{1}{2}}$ ) o que confirma que o parâmetro do tamanho desempenha um papel fundamental na previsão da vida à fadiga e no desenvolvimento de fractura devido à fadiga.

Amostras	$(Área)^{\frac{1}{2}} (\mu m)$	Max. Diâmetro de Feret ( $\mu m$ )	Resistência à fadiga para $10^7$ ciclos (MPa)
A	190	395	62,8
B	203	440	60,3
C	422	725	50,0
D	422	665	61,2

**Tabela 2.1 Estimativa dos maiores tamanhos para os poros e resistência a fadiga para amostras de AlSi7Mg. [8]**

#### **2.4.1 – Metodologias utilizadas na Caracterização de Defeitos**

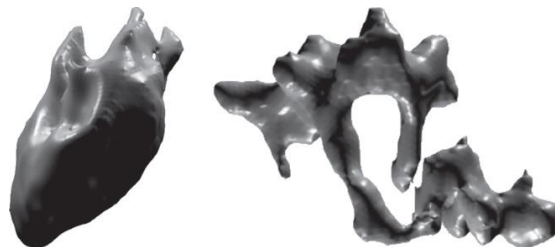
No âmbito da caracterização de defeitos de fundição, a fractografia, a radiografia e metalografia têm sido as principais técnicas utilizadas para a sua investigação. Contudo, nos últimos anos tem sido utilizado o método da tomografia com auxílio do computador (CT), visto que se conseguem reconstruções em três dimensões bastante precisas dos defeitos interiores dos materiais, nomeadamente as porosidades, o que enriquece bastante o trabalho de simulação numérica [7] [8] [9].

Este método é um ensaio não destrutivo que consiste na irradiação com uma fonte de raios- X, de diversos ângulos, de onde são tiradas várias radiografias (pode-se seleccionar o número de radiografias tiradas por grau de rotação e o nível de resolução de imagem). As várias imagens são depois reconstruídas com auxílio de um computador para gerar uma imagem a três dimensões do objecto irradiado [12].

#### **2.4.2 – Efeito dos defeitos na Concentração de Tensões**

Estudos [7] [8] [9] têm sido realizados para perceber como é que a geometria, tamanho, orientação e a distância entre poros e a superfície do material influenciam as concentrações de tensões.

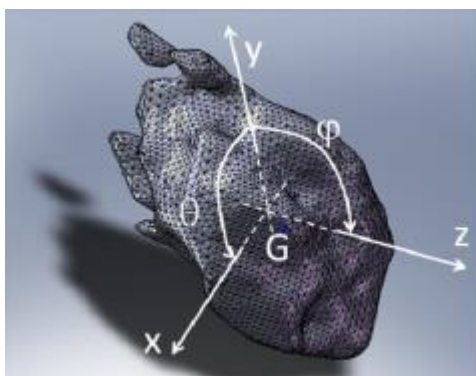
Em [8], após uma precisa reconstrução dos poros por  $\mu$ CT, ilustrado na Figura 2.7, e considerando que as propriedades mecânicas do material são homogéneas, foi colocado cada um desses poros num modelo cilíndrico com 4 mm de diâmetro e 1 mm de altura, para simular um teste simples de tracção e compressão através do método dos elementos finitos; a região que rodeia os poros foi modelada para poder estimar correctamente o factor de concentração de tensões em função da geometria e tipo de carregamento. Para tal, o elemento utilizado para a criação da malha foi o elemento tetraédrico de quatro nós (C3D4 do código ABACUS).



**Figura 2.7 Reconstrução dos poros através de  $\mu$ CT. A esquerda encontra-se o poro e à direita o provocado pelo encolhimento do metal no arrefecimento. [8]**

A malha de elementos finitos da superfície do poro ilustrado na Figura 2.8 tem um número total de elementos finitos de  $2 \times 10^5$  e a distribuição das tensões para a aplicação da carga

segundo o eixo  $y$  foi determinada, tendo sido calculado o pico de tensão e o factor de concentração de tensões  $K_t$  definido como o rácio do pico das concentrações de Von Mises e a tensão nominal orientada consoante a orientação escolhida para o poro [8].



**Figura 2.8 Malha da superfície do poro e localização do sistema de coordenadas, o eixo  $y$  é paralelo ao carregamento. [8]**

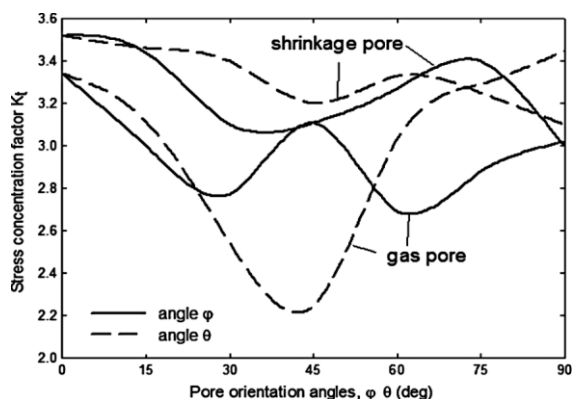
Um sistema de coordenadas, centrado no centro de gravidade do poro, com dois eixos de rotação  $\varphi$  e  $\Theta$ , ilustrados na Fig. 2.8, foi definido para investigar o papel combinado da morfologia e da direcção de carregamento no valor do factor de concentração de tensões,  $K_t$ . Neste estudo, cada poro foi rodado numa amplitude de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  obtendo-se o gráfico representado na Figura 2.9, que mostra a distribuição do  $K_t$  em função dos ângulos  $\varphi$  e  $\Theta$ .

A média do  $K_t$ , para porosidades decorrentes do encolhimento do metal é de 3.28 e para as porosidades com origem em gases é de 2.98; estes valores levam a concluir que a morfologia dos poros mais esféricos provoca um efeito menor na concentração de tensões.

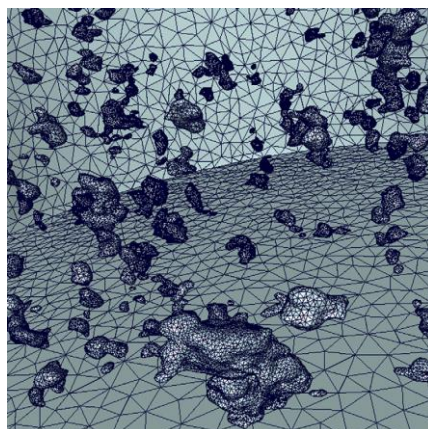
Em [7], numa tentativa de perceber qual o efeito do tamanhos dos poros na concentração de tensões, foi criado um bloco cilíndrico, com 2 mm de altura.

A malha 3D foi refinada junto dos poros, sendo composta por 600 000 a 1 500 000 elementos finitos ilustrados na Figura 2.10.

Para a simulação considerou-se o material linear elástico, com um Módulo de Young de 70 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,3. Foi imposto um



**Figura 2.9 Distribuição da concentração de tensões para diferentes orientações. [8]**



**Figura 2.10 Exemplo da malha criada [7]**

deslocamento uniaxial para a extremidade superior, e a extremidade inferior foi mantida a uma altura.

Com o objectivo de analisar convenientemente os dados da simulação, conseguiu-se associar cada poro à sua zona de influência; os resultados foram convertidos numa imagem volumétrica, que foi posteriormente dividida em fatias segundo o *eixo z* (altura da amostra). As imagens obtidas mostram uma região vermelha que envolve os poros de maiores dimensões (Fig. 2.11), estas regiões podem ser consideradas como zonas de influência dos poros e cada poro pôde posteriormente ser caracterizado pelo volume da sua zona de influência. Esta zona de influência pode de certa forma estar relacionada com a microplasticidade que se desenvolve nas imediações dos poros.

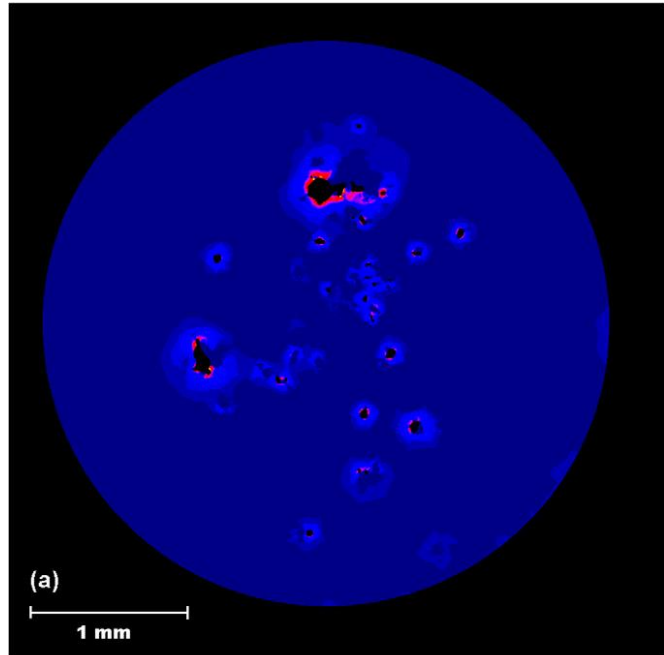


Figura 2.11 Output dos resultados obtidos pelos MEF [7]

Num outro estudo [9], o material foi considerado linear elástico com um Módulo de Young de 70 GPa e um Coeficiente de Poisson de 0,33.

Para poros arredondados, a influência do tamanho do poro e a sua distância a superfície na concentração de tensões foi determinada. Tijani [9] conclui que o factor de concentração de tensões em função do rácio da distância à superfície (medida desde o centro do poro) e diâmetro do poro (Fig. 2.12).

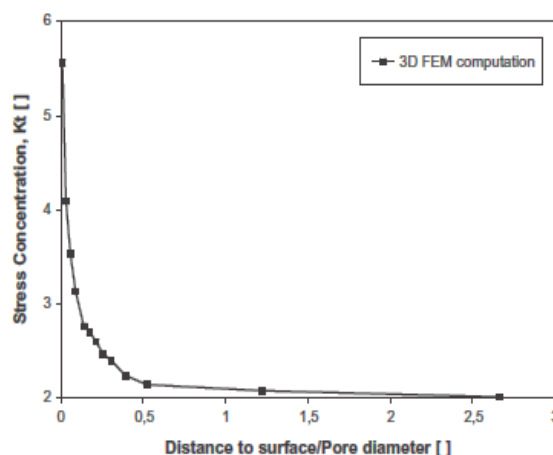
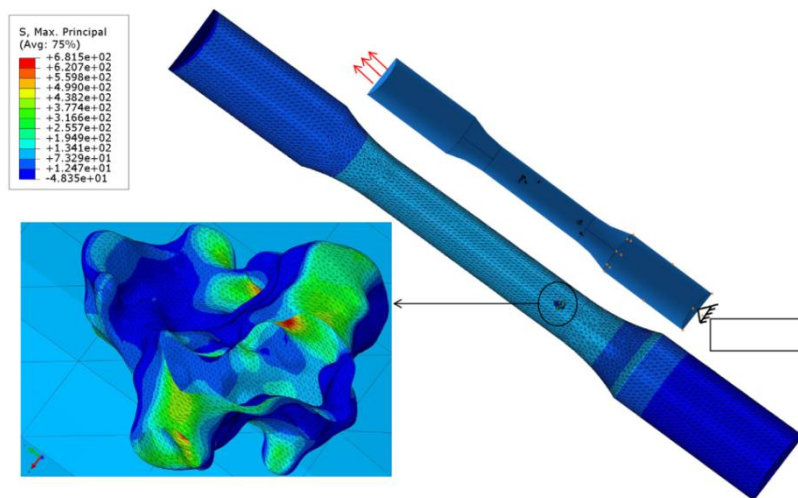


Figura 2.12  $K_t$  para poros arredondados em função do rácio distância-diâmetro. [9]

- Para *distância à superfície/ diâmetro do poro*  $< 0,5$  o  $K_t$  aumenta progressivamente o que indica que  $K_t$  é maior se o poro se encontrar perto da superfície.
- Para *distância à superfície/ diâmetro do poro*  $> 0,5$  o  $K_t$  diminui se o poro se for afastando da superfície.

Estes resultados mostram que para poros arredondados o seu efeito no  $K_t$  é maior quanto menor for a sua distância à superfície. No que diz respeito aos poros não arredondados após reconstrução por tomografia foi gerada a malha representativa deste poro que por sua vez foi exportada para o programa de EF onde foi feito o cálculo linear elástico com uma tensão nominal de 90 MPa.



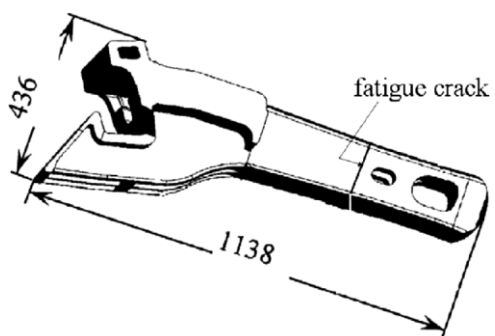
**Figura 2.13 Modelo de EF onde estão representadas as condições de fronteira e a direcção do carregamento, poro com a maior concentração de tensões e distribuição de tensões desse mesmo poro. [9]**

Na Figura 2.13 pode-se observar que a maior concentração ocorre nos poros que se encontram nas regiões entre outros poros e a superfície da amostra.

## 2.5 – Estudos em Componentes Ferroviários

Uma vez que o objecto de estudo analisado nesta dissertação é o componente ferroviário, foram analisados dois estudos [1][6] que relacionam os defeitos de fundição com a vida à fadiga e iniciação de fissuras neste tipo de componentes construídos em material metálico.

No que diz respeito a componentes ferroviários, um dos aspectos mais importantes a



**Figura 2.14 Engate automático SA-3. [6]**

ter em conta no projecto é a fadiga estrutural. Este fenómeno físico de carácter dinâmico, provoca entre 80 a 90 % da ruína de estruturas sujeitas a esforços mecânicos que trabalham à temperatura ambiente [13]. Este fenómeno – fadiga mecânica - consiste num processo de alteração estrutural permanente do componente quando sujeito a carregamento de tipo dinâmico, cuja ocorrência é progressiva e localizada, e ocorre em zonas onde existem tensões e extensões elevadas devidas a variações bruscas da geometria (concentração de tensões), diferenças de temperatura e imperfeições no material, e que pode resultar na propagação de uma fenda ou na falha do componente após a aplicação de um número de ciclos de carregamento suficientes. A duração de um componente à fadiga é geralmente definida pelo número de ciclos de aplicação da carga até à ocorrência da disfunção do componente [13].

Em [6], um “engate” automático SA-3, (Fig. 2.14) fabricado em aço vazado GS20Mn5, foi estudado e foram encontrados defeitos dimensionais, tais como inclusões, porosidades e fissuração a quente que acabaram por conduzir à fissuração do mesmo.

O autor conclui que a fadiga foi a principal causa de falha; contudo as fendas tiveram início junto de poros que actuaram como pontos de concentração de tensões, como seria de esperar, reafirmando a importância do controlo do processo de fundição, uma vez que desvios na composição do componente, mais precisamente numa variação das quantidades de Mn e Si, levaram ao aparecimento de fissuração a quente e inclusões. Estas, tal como os poros, actuam como pontos de concentração de tensões e facilitam a iniciação de fissuras.

Em [1], um “engate” automático do tipo “ATLAS”, fabricado em aço vazado ASTM A148 90-60, foi analisado devido ao aparecimento de uma fissura que teve início numa porosidade com dimensão de 0,8 mm. A autora concluiu que existiram desvios na composição do componente, mais precisamente nos níveis de fósforo e enxofre, e que os níveis de manganês tenderam a diminuir o efeito do enxofre, o que se traduziu numa menor resistência intergranular. Para além do referido, concluiu-se também que a resistência à fadiga do componente era baixa para as condições em serviço do mesmo, uma vez que existia uma grande densidade de defeitos e poros à superfície, nas zonas críticas do componente.





## Capítulo 3 – Estudo Experimental

### 3.1 Introdução

A análise metalográfica assume um papel de grande importância em Engenharia, uma vez que é através dela que se determinam e controlam as microestruturas, as quais têm uma grande influência nas propriedades mecânicas e físicas dos materiais e no sucesso da sua aplicação.

Neste capítulo encontra-se a descrição de todo o procedimento experimental, os ensaios realizados, equipamentos utilizados, normas e metodologias utilizadas para a realização dos mesmos. Estes ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e no Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies (ICEMS-IST).

### 3.2 Amostras

As amostras utilizadas para a caracterização do material através da análise microestrutural e tomográfica foram retiradas de uma peça prismática, (Fig. 3.1) obtida por fundição com moldação em areia, com as especificações ASTM A148 90-60 [3], com tratamento térmico não especificado, as quais correspondem as especificações utilizadas no componente mecânico em estudo.

A preparação das amostras foi realizada tendo em consideração os procedimentos referidos na norma ASTM E3-01 [14].

A peça prismática foi seccionada transversalmente com o auxílio de uma serra, tendo sido produzidas 15 amostras com uma espessura de 10mm cada, como se pode observar na Figura 3.1.



Figura 3.1 Exemplar da peça fundida devidamente seccionada.

Após devidamente seccionadas, foi feito um desbaste nas duas faces de cada amostra, através de uma fresadora, para nivelar e diminuir a rugosidade superficial das amostras (Fig. 3.2 e 3.3).



**Figura 3.2 Acabamento superficial dos provetes seccionados: antes (esquerda) e depois da utilização da fresadora (direita).**



**Figura 3.3 Operação de desbaste efectuada na fresadora.**

Posteriormente, no polimento das amostras foi utilizada uma polideira rotativa da marca Struers DAP-V, de velocidade variável. Para tal foram utilizadas diversas lixas, de carboneto de silício (SiC) e com granulometria variável entre 80 e 1200, as quais foram afixadas e lubrificadas com água corrente. O processo de polimento utilizado foi um processo manual, tendo sido utilizada uma velocidade de rotação de 300 r.p.m. para o prato de suporte das lixas.

### **3.3 Análise Óptica (2D)**

A observação das amostras foi feita com auxílio de um microscópio NIKON, com uma câmara digital acoplada OLYMPUS DP10 (Fig.3.4), que possibilita a aquisição de fotografias para PC através do *software* OLYMPUS C-Y95. Este microscópio permite ampliações de 5, 10, 20, 40 e 100x, estando estes valores sujeitos a uma ampliação de 10x devido ao valor da ocular.



**Figura 3.4 Microscópio óptico NIKON**

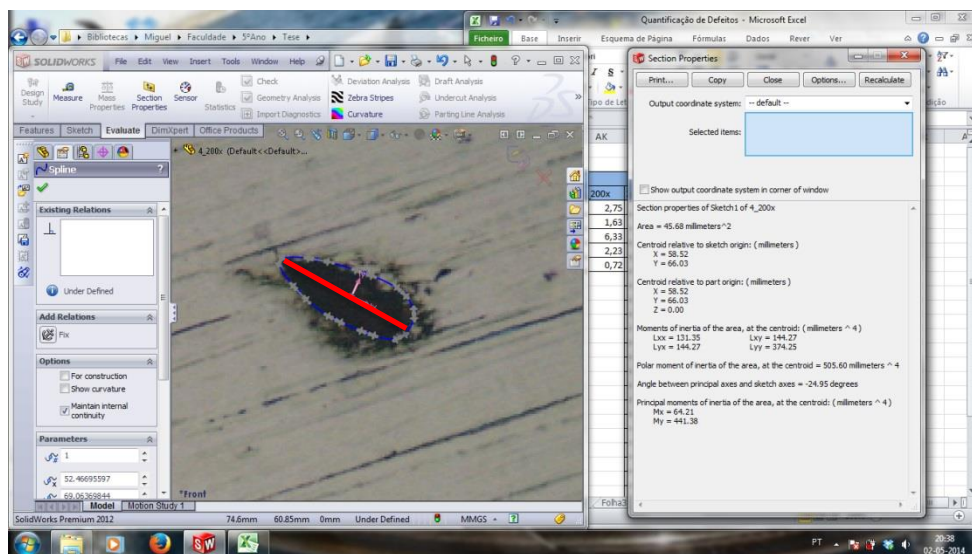
As observações seguiram a norma ASTM E 2109-01 [15], e tinham como objectivo principal avaliar as áreas, e os tamanhos dos defeitos presentes na peça obtida por fundição.

Foram retiradas 5 fotografias à superfície de cada amostra, com distribuição aleatória e com uma ampliação de 200x, perfazendo um total de 75 fotografias.

Pelo *Método A*, indicado na norma ASTM E 2109-01 [15], que consiste na comparação directa de imagens padrão com as retiradas concluiu-se que a fundição se encontra em boas condições e portanto seria aceite pela indústria ferroviária, uma vez que esta apresentava uma percentagem de área ocupada por porosidades inferior a 0,5%.

As fotografias foram posteriormente analisadas com o objectivo de medir as áreas ocupadas pelos poros, bem como o diâmetro máximo de Feret – maior distancia entre os limites dos poros-, como proposto por Murakami-Endo [16] e pelo modelo modificado de Bathias e Paris [17] para a previsão da resistência à fadiga.

As áreas e diâmetros dos poros foram medidos com auxílio do programa de modelação *SolidWorks*. Para tal as imagens foram inseridas no programa com uma área de 90x112,5 mm, onde foi feito o contorno do defeito e respectiva medição (Fig 3.5); este processo foi repetido em todas as fotografias para cada poro observado.

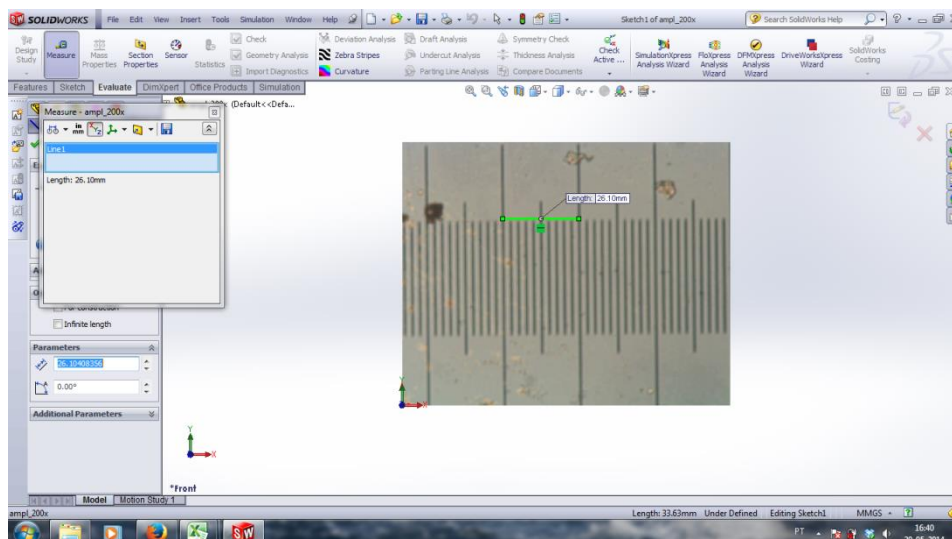


**Figura 3.5 Exemplo de medição da área de um poro e diâmetro máximo de Feret (a vermelho).**

A conversão das medições obtidas através do SolidWorks foi feita utilizando um *objective micrometer* da marca Struers (Fig.3.6). Para tal foi retirada uma fotografia ao *objective micrometer*, com ampliação 200x, que foi posteriormente inserida no programa *SolidWorks*, com a mesma área que anteriormente, 90x112,5 mm, obtendo desta maneira a correspondência real de 261 mm para 1 mm como ilustrado na Figura 3.7.



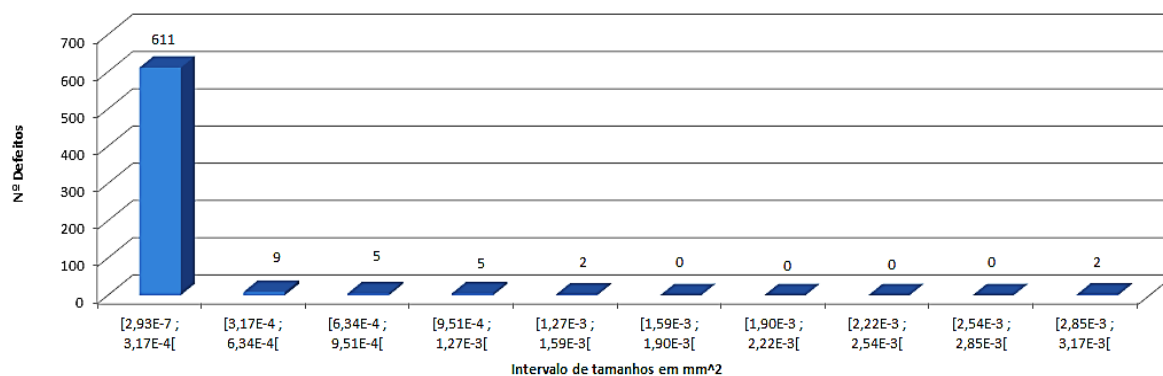
**Figura 3.6 Objective Micrometer marca Struers.**



**Figura 3.7 Conversão medida real vs. medições no programa SolidWorks.**

Uma vez concluídas as medições foi feito um tratamento de dados no Excel, de forma a perceber quais os tamanhos mais frequentes para serem utilizados na previsão da vida à fadiga deste tipo de componentes em aço vazado presente no capítulo 4 desta dissertação. Obteve-se assim o seguinte gráfico, tendo em conta as classes de áreas de defeitos com frequência absolutas mais significativas.

**Frequência dos tamanhos dos poros encontrados**



**Figura 3.8. Gráfico com frequências absolutas de defeitos mais significativos por classes de área.**

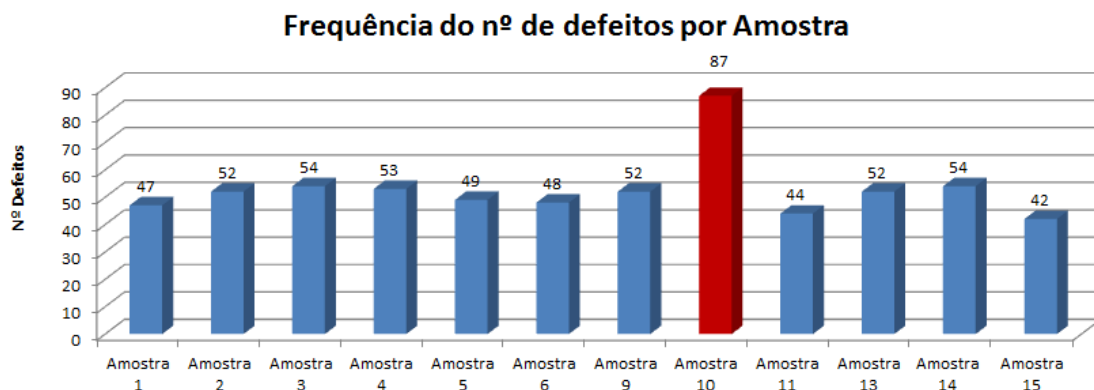
Com este gráfico de frequência pode-se comprovar novamente o bom estado da fundição; contudo, no estudo do comportamento à fadiga será utilizada a classe com maiores dimensões, uma vez que quanto maiores forem as dimensões dos poros maior é o efeito negativo na vida à fadiga.

### 3.4 Micro-Tomografia (3D) ( $\mu$ CT)

Na perspectiva duma simulação mais fidedigna e com melhores resultados, optou-se por uma análise 3D utilizando um método não-destrutivo de vanguarda  $\mu$ CT, já utilizadas em estudos do mesmo género [7] [8] [9].

O objectivo desta análise era descobrir a geometria real dos poros e ver como esta afecta as tensões no componente, tentando perceber se a geometria real é ou não mais prejudicial que as geometrias geralmente adoptadas neste tipo de estudos, que são consideradas como esféricas ou elípticas. Este método pode permitir que, a nível de simulação numérica por elementos finitos, se consigam resultados mais aproximados da realidade, uma vez que se assume uma geometria mais complexa para os poros.

Para a preparação da  $\mu$ CT e uma vez que este aparelho tem grandes limitações a nível das dimensões das amostras, devido ao espaço existente para colocação da amostra e também a nível da densidade do material que impede os raios-X de atravessar a espessura das amostras em questão, foi seleccionada a amostra com maior número de poros (Fig.3.9), tendo em conta os dados recolhidos na observação óptica, aumentando assim a probabilidade de encontrar poros para análise tomográfica.



**Figura 3.9. Frequência do número de defeitos por amostra.**

Como base na Figura 3.9, a amostra 10 foi cortada em tiras com aproximadamente 1 mm de espessura, como representado na Figura 3.10. Uma vez encontrados poros nas tiras de aço, estas foram cortadas de modo a obter uma amostra com tamanho admissível para inserção na máquina de tomografia.





**Figura 3.10. Corte da amostra 10 em tiras para observação através de micro-tomografia.**

A amostra final obtida tinha forma rectangular, com 4 mm de largura e 1 mm de espessura, como se pode observar na Figura 3.11, onde, à esquerda, se encontra a amostra final e à direita a amostra colocada na máquina de tomografia, que como se pode observar, tem grandes limitações no que toca a dimensões possíveis de analisar.



**Figura 3.11. Amostra final a direita, amostra colocada para observação tomográfica a esquerda.**

O trabalho de análise tomográfica foi realizado no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do IST (LAMPIS), com o auxílio do Professor Manuel Pereira e do Professor António Maurício, do grupo de investigação CEPGIS/CERENA do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

O equipamento utilizado foi um micro-tomógrafo Skyscan 1172 (Fig.3.12) de alta resolução onde os dados analíticos são resultado da combinação do sistema microscópico de radiografias e um computador com a reconstrução tomográfica (NRecon), software de visualização e análise (Dataviewer, CTAn e CTVox).

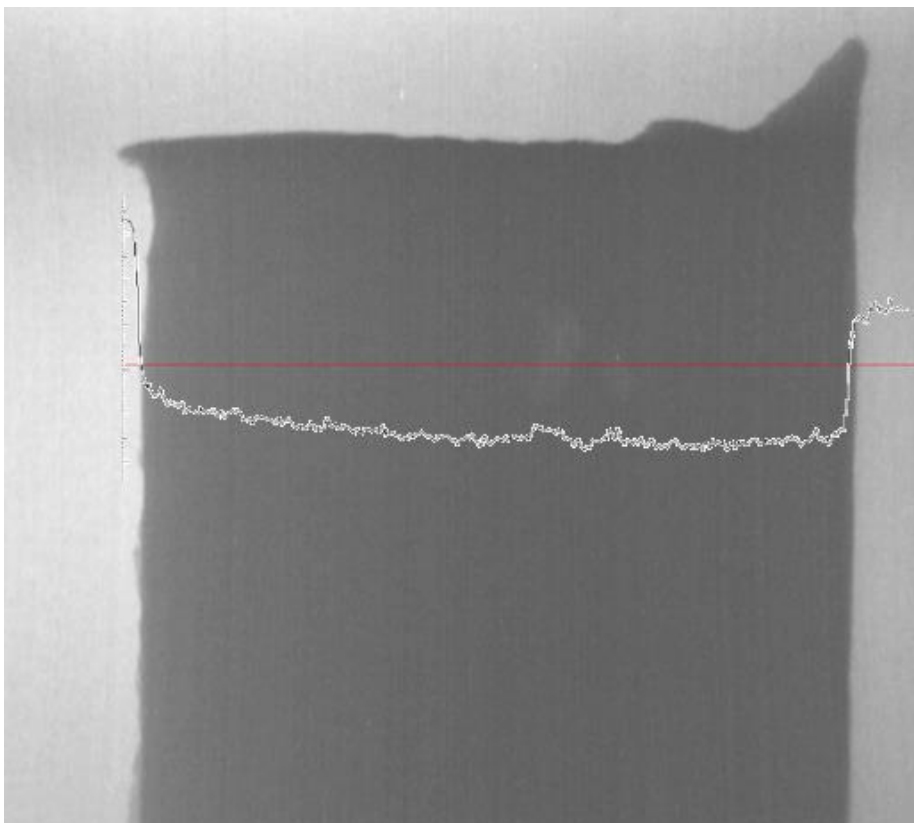


**Figura 3.12. Micro-tomógrafo Skyscan 1172**

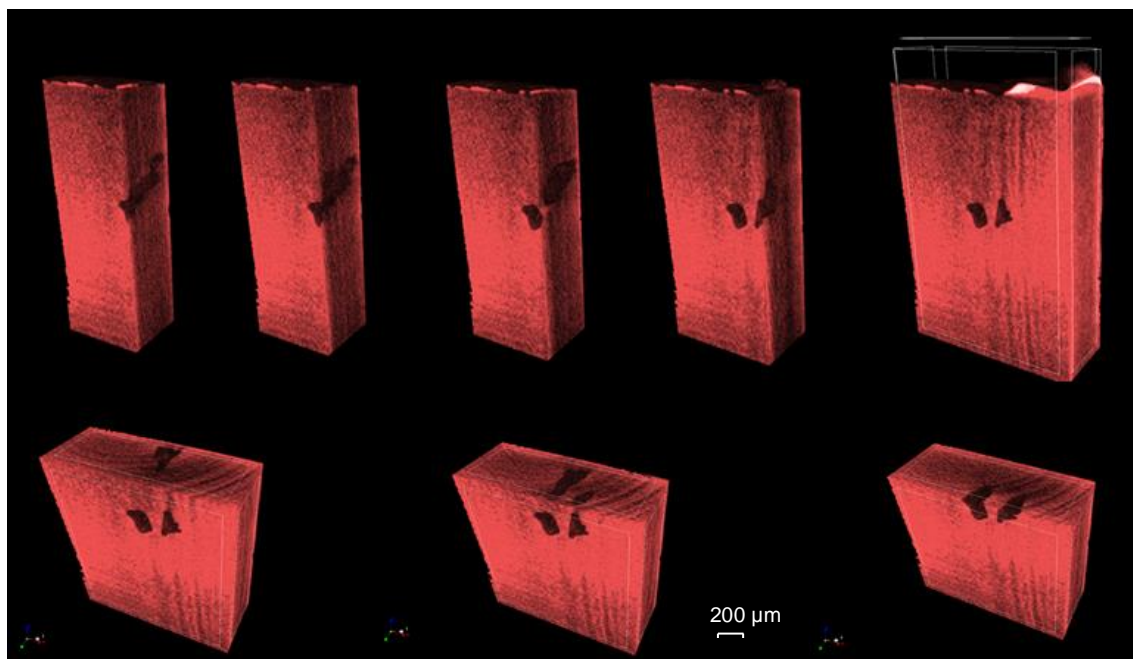
As amostras foram observadas com uma voltagem de 85 kV e uma corrente de 116 A, para um tamanho de pixel de 4,80  $\mu\text{m}$ .

Todo o processo de operação  $\mu\text{CT}$  foi otimizado para produzir as melhores imagens, reduzindo o ruído o máximo possível.

Para um correcta reconstrução 3D das radiografias, exemplo na Figura 3.13, é necessário fazer um tratamento de imagem, com o objectivo de fazer um despiste do que é realmente um poro ou não para melhorar a zona envolvente do poro por meio de tratamento de imagem. Na figura 3.13 está ilustrada uma radiografia, na qual foi sobreposta uma linha vermelha, e a linha a branco evidencia as diferenças de densidade. Como se pode observar, existem picos na zona exterior da amostra, que correspondem ao ar e dois ligeiros picos no local dos poros, todo a tratamento de imagem tem como base este tipo de verificação.



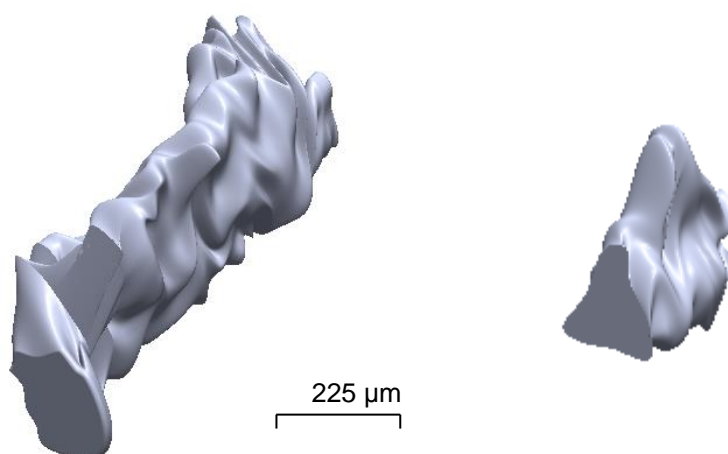
**Figura 3.13. Radiografia com sobreposição do espectro para localizações de poros ao longo da linha vermelha.**



**Figura 3.14. Reconstrução tomográfica em perspectiva com corte ao longo do plano xy e yz.**

Uma vez concluído o tratamento de imagem, foi realizada a reconstrução tomográfica da amostra e posteriormente a dos poros encontrados. Na figura 3.14 está representada a amostra da figura 3.11, após reconstrução tomográfica, em perspectiva, com diversos cortes ao longo dos diferentes planos, com o propósito de mostrar a complexidade da forma dos poros.

Após a aquisição de dados foi feita a reconstituição dos poros encontrados em *SolidWorks*, de maneira a que estes se tornassem compatíveis com os programas de simulação numérica para análise posterior presente no capítulo 5 e representados na figura 3.15 abaixo.



**Figura 3.15. Poros encontrados na amostra sujeita a tomografia reconstruídos em *SolidWorks***



Os poros acima representados não têm qualquer correspondência com as classes de tamanhos da figura 3.8 uma vez que estes poros têm dimensões bastantes superiores aos observados por microscópio.



## Capítulo 4 – Mecânica da Fractura

### 4.1 Introdução

Os motivos que podem causar uma fissura no material são diversos, podendo advir do processo de fabrico, de danos provocados durante o funcionamento em condições de serviço através de fenómenos como fadiga, corrosão, etc.

Neste capítulo serão abordados conceitos relacionados com a Mecânica da Fractura Linear Elástica, bem como os modelos existentes de previsão de propagação de fissuras, seguido da análise de um caso prático.

### 4.2 Conceitos Gerais

Quando um material sofre dano, decorrente da aplicação de uma gama de tensão de valor maior do que a tensão limite de fadiga durante um determinado número de ciclos, uma micro fissura poderá nuclear, crescer e propagar-se. Nestes casos, o procedimento de cálculo de vida à fadiga através da Curva S-N, para um todo deixa de ser aplicável e é preciso ter em conta a propagação de fissuras macroscópicas que poderão, ou não, crescer resultando numa falha do componente.

A inspecção visual de superfícies fracturadas dá-nos informações valiosas no que diz respeito aos mecanismos de propagação de defeitos com base na mecânica da fractura e são geralmente distinguidos os seguintes tipos de fractura em materiais metálicos:

- *Deformação plástica devido a tensões de corte*
- *Colapso plástico devido a tensões normais*
- *Clivagem*
- *Fadiga, fluência*

#### 4.2.1 Fadiga

O mecanismo de propagação de defeitos à fadiga ocorre quando uma fissura é sujeita a ciclos de carregamento com intensidade variável no tempo, que provoca um deslocamento pequeno da ponta da fenda devido às tensões de carregamento suficientes para aumentar o tamanho da fissura em cada ciclo, sem que este fracture de forma instável, a não ser ao fim de um grande número de ciclos, resultando, neste caso, numa falha por Fadiga. O número de ciclos necessário para a falha total do componente, está fortemente relacionado com a amplitude de tensões  $\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min})$  e com a tensão media  $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min})$ .

Na figura 4.1 pode-se observar perfeitamente as estrias de propagação das fendas por fadiga e a localização dos pontos de iniciação dos defeitos (indicados pelas setas) .

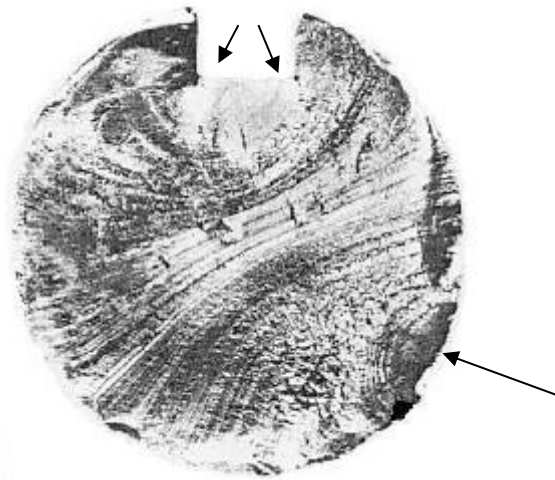


Figura 4.1 Superfície fracturada por fadiga.[17]

#### 4.2.2 Modos de Falha

Irwin foi um dos pioneiros no estudo do comportamento de fissuras, onde introduziu três tipos diferentes de carregamento, (Fig. 4.2), que dependem da forma como cada uma das superfícies da fenda se move em relação à direcção do carregamento e à natureza dos esforços aplicados na extremidade do defeito; estes modos de propagação são utilizados ainda hoje em dia.

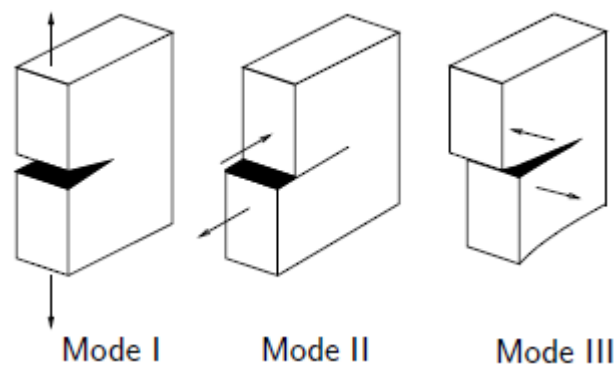


Figura 4.2 Modos de Deformação. [17]

O modo I também chamado *modo de abertura*, é caracterizado pelo afastamento das duas superfícies de fractura motivado pela aplicação de um carregamento perpendicular à direcção de propagação da fenda.

O modo II, *modo de corte*, é caracterizado por um deslizamento de uma superfície de fractura sobre a outra segundo a direcção de carregamento ao corte aplicado no mesmo plano.

Por fim o modo III, ou *modo de rasgamento*, caracteriza-se pelo escorregamento entre duas superfícies fissuradas segundo uma direcção perpendicular à direcção de propagação da fissura.

#### **4.2.3 Mecânica da Fractura Linear Elástica**

A Mecânica da Fractura Linear Elástica (MFLE) usa conceitos e teorias que assumem a existência, na frente da fenda, de uma região, de pequena dimensão, onde ocorre plastificação, permanecendo o material circunvizinho à frente da fenda no domínio linear elástico. .

Durante o crescimento da fissura e segundo o critério de Griffith, assume-se que o crescimento da fissura ocorre quando existe energia suficiente para gerar duas novas superfícies (decorrente da formação da fissura). O crescimento da fissura pode também ser baseado no estado de tensão existente na ponta da fenda onde o campo de tensões pode ser determinado analiticamente e é caracterizado pelo factor de intensidade de tensões  $K$ ; neste caso, o critério é referido como local, visto que as atenções são focadas num pequeno volume de material na ponta de fenda.

Devido à singularidade do campo de tensões existente na extremidade da fenda, assume-se, teoricamente, que as tensões são infinitas, o que é obviamente impossível, uma vez que ocorrerá deformação plástica na ponta da fenda. Contudo, usando o critério de Von Mises ou de Tresca por exemplo, a zona plástica pode ser determinada e se esta zona for pequena o suficiente, então o conceito de MFLE pode ser utilizado.

#### **4.2.4 Experimentação na Mecânica da Fractura**

A detecção de fissuras é obtida por ensaios experimentais de inspecção não destrutiva, que vão de métodos simples e baratos, a métodos sofisticados e caros. A inspecção tem como objectivos, não só a detecção de fissuras, mas a determinação precisa (com alguma probabilidade de erro) da sua geometria e condições de carregamento.

### **4.3 Previsão Crescimento de Fenda**

#### **4.3.1 Modelos de Previsão do Crescimento de Fenda**

Nos vários modelos de previsão da vida à fadiga de estruturas, relaciona-se o crescimento da fenda com a amplitude ou a gama de tensões aplicadas ao componente,  $\frac{da}{dN}$ .

Dentro dos modelos de previsão da vida à fadiga existem modelos microestruturais que relacionam o crescimento de fenda com parâmetros microestruturais, tais como espaçamento

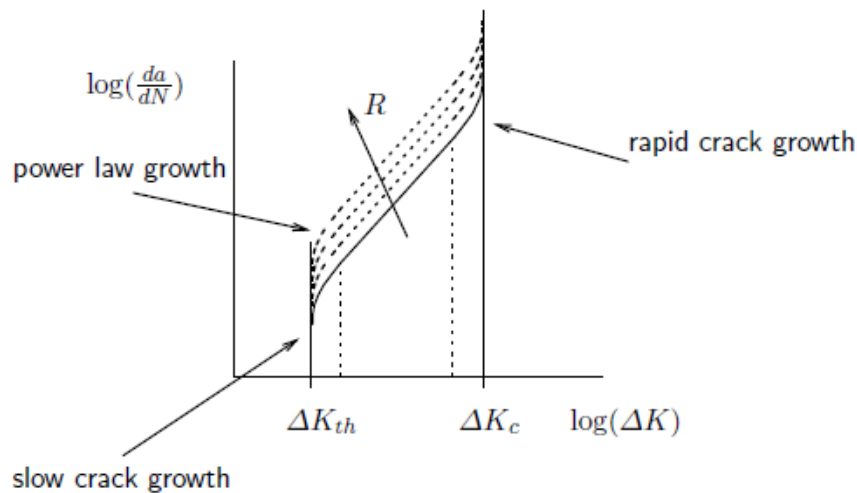
entre estrias, ou modelos fenomenológicos que são formulados e ajustados com experimentação e inspecção minuciosa.

Contudo na MFLE, em condições de propagação de defeitos em regime II, a velocidade de propagação de defeitos,  $\frac{da}{dN}$ , é relacionada com  $\Delta K$  pela Lei de Paris, a qual usa dois parâmetros, um coeficiente,  $C$ , e um expoente,  $m$ , dada pela eq. 4.1:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4.1)$$

Paris & Erdogan publicaram a lei de propagação de fenda em 1963 e esta continua a ser amplamente utilizada em problemas de Engenharia. A Lei de Paris é representada por uma linha recta onde os dois parâmetros  $C$  e  $m$ , podem ser facilmente obtidos quando dois pontos do gráfico são conhecidos. Tanto o valor de  $C$  com o de  $m$  dependem, entre outros factores, do material, da geometria, do carregamento e da frequência do carregamento.

Contudo, a Lei de Paris tem um campo de aplicação preciso dentro do regime de crescimento de fenda, isto é, é aplicada para valores de  $\Delta K$  maiores ou iguais ao valor limiar de propagação,  $\Delta K_{th}$ , (Figura 4.3). Simultaneamente, o crescimento da fenda, para valores de  $\Delta K$  muito próximos de  $\Delta K_c$ , é muito mais acelerado do que previsto pela Lei de Paris, tal como ilustrado na Figura 4.3 abaixo.



**Figura 4.3 Limites de aplicação da Lei de Paris. [17]**

A literatura consultada [18] sugere que os valores de  $\Delta K_{th}$  dependem fortemente do ambiente e do valor de razão de tensão,  $R$ . Assim sendo o projecto de norma PD 6493:1997 (e agora a norma BS 7910:2013) sugerem, para aços em carbono e aço em carbono e manganês exposto ao ar ou em ambientes marítimos, que o valor de  $\Delta K_{th}$  em  $N/mm^{3/2}$  deve seguir a seguinte fórmula:

$$\Delta K_{th} = 170 - 214R \quad (4.2)$$

Da equação 4.2, para um valor de  $R=0.1$  considerado na presente dissertação, tem-se um valor de  $\Delta K_{th} = 4.7 \text{ MPa} \sqrt{m}$ .

No caso desta dissertação, o modelo de previsão utilizado foi a Lei de Paris, e as curvas da Lei de Paris para diferentes fiabilidades e, conseqüentemente, os valores de  $C$  e  $m$ , para uma razão de tensões de 0.1, foram disponibilizados, por cortesia pela Prof<sup>a</sup>. Doutora Teresa Morgado, de [1] e [19] e estão representados na Figura 4.4.

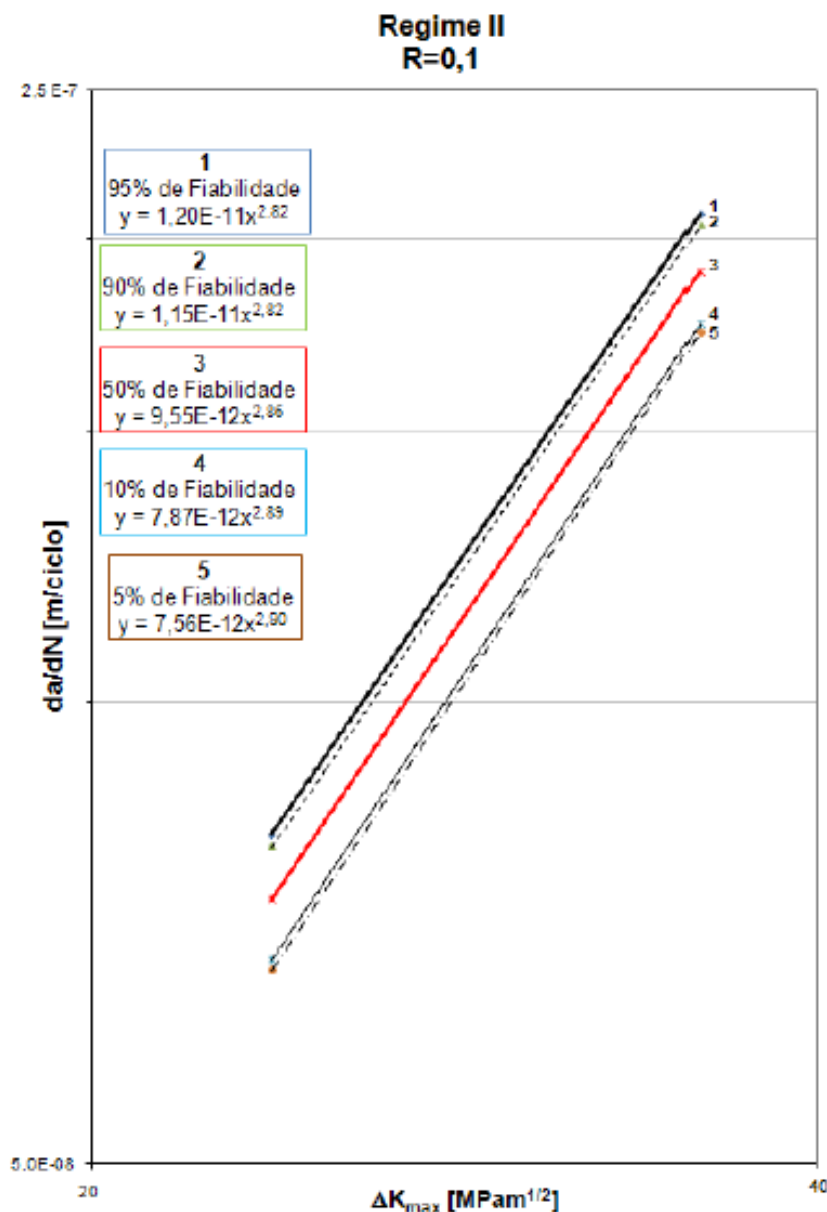


Figura 4.4 Curva de propagação no regime II para fiabilidade de 5%, 10%, 50%, 90% e 95%. [1]

Segundo o projecto de norma PD 6493:1997 [18], os valores recomendados das constantes  $C$  e  $m$ , para aços ferríticos com tensões de cedência abaixo dos 600 MPa, que operam ao ar livre, em condições ambientais pouco agressivas, e temperaturas até aos 100°C, são de  $m = 3$  e  $C = 9,48 \times 10^{-12} \text{ MPa} \sqrt{m}$ , valores praticamente iguais aos calculados experimentalmente e justificando assim a sua utilização.

#### 4.3.2 Ritmo de Crescimento

Através de ensaios experimentais foi demonstrado que o comprimento/profundidade de fenda  $a$  é uma função exponencial do número de ciclos  $N$  e que o seu comprimento inicial à fadiga,  $a_i$ , é um parâmetro bastante importante na vida à fadiga (Figura 4.5).

Existem três etapas no crescimento de uma fenda, como ilustrado na Figura 4.5; na primeira etapa, o crescimento de fenda é principalmente provocada por tensões de corte e envolve escorregamento de planos cristalográficos preferenciais e o ritmo de crescimento de fenda é, por norma, inferior a 0,25 nm/ciclo [17].

Na segunda etapa, a propagação da fenda tem um ritmo mais acelerado e é provocado por tensões de tração que envolvem a activação de planos cristalográficos e consequente plastificação em múltiplos planos na ponta da fenda.

Após um certo número de ciclos, o comprimento de fenda  $a_1$  é atingido e a velocidade de propagação aumenta substancialmente até atingir o limite de vida à fadiga,  $N_f$  e  $a_f$ , que depois de alguns ciclos atinge o tamanho crítico,  $a_c$ , dando ocorrência de uma falha instável e súbita.

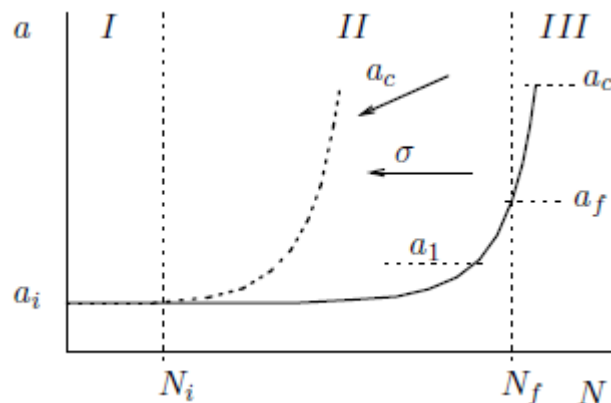


Figura 4.5 Etapas de Crescimento de Fenda.  
[17]

Outro parâmetro a ter em consideração na velocidade de propagação da fenda são as amplitudes de carga, cuja tendência é ser mais rápida para amplitudes maiores de carga.



### 4.3.3 Cálculo do factor de intensidade de tensões

Para se obter o gráfico de propagação de fenda vs número de ciclos de fadiga, foi necessário calcular o valor do factor de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , existente na frente de uma fenda existente no componente ferroviário em estudo na presente dissertação. Para tal seguiu-se o projecto de norma PD 6493:1997 [18], que para análises de comportamento à fadiga sugere que o factor de intensidade de tensões seja calculado usando eq. 4.3:

$$\Delta K = (Y\Delta\sigma)\sqrt{\pi a} \quad (4.3)$$

onde  $(Y\Delta\sigma)$  depende da gama de tensões nominais, de uma função de forma,  $Y$ , e sendo  $a$  o comprimento da fenda.

Por sua vez tem-se que:

$$(Y\Delta\sigma) = Mf_w [K_{tm}M_{km}M_m\Delta\sigma_m + K_{tb}M_{kb}M_b\{\Delta\sigma_b + (K_m - 1)\Delta\sigma_m\}] \quad (4.4)$$

onde  $\Delta\sigma_m$  e  $\Delta\sigma_b$  são as gamas das tensões nominais de membrana e de flexão, respectivamente, aplicadas remotamente ao componente.

Uma vez que os esforços de flexão são desprezáveis no componente em estudo [20], e não existem ligações soldadas no componente ferroviário, nem qualquer desalinhamento entre placas soldadas, as equações (4.3 – 4.4) simplificam-se (eq. 4-5):

$$\Delta K = Mf_w K_{tm} M_m \Delta\sigma_m \sqrt{\pi a} \quad (4.5)$$

Visto tratarem-se de tensões locais assumiu-se no calculo, que o valor de  $K_{tm} = 1$  uma vez que o factor de concentração já se encontra contabilizado devido a geometria do componente.

Para um defeito superficial com forma semi-elíptica, planar, existente em placa, submetida a um carregamento do tipo membrana (uniforme de tracção) tem-se [18]:

$$f_w = \left\{ \sec \left[ \left( \frac{\pi c}{W} \right) \left( \frac{a}{B} \right)^{0,5} \right] \right\}^{0,5} \quad (4.6)$$

As condições do carregamento são do tipo membrana se:

$$0 \leq \frac{a}{2c} \leq 1; \frac{2c}{W} < 0,5; 0 \leq \theta \leq \pi;$$

e

$$\frac{a}{B} < 1,25 \left( \frac{a}{c} + 0,6 \right) \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,1$$

ou

$$\frac{a}{B} < 1 \quad \text{para } 0,1 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

onde

$$M_m = \left\{ M_1 + M_2 \left( \frac{a}{B} \right)^2 + M_3 \left( \frac{a}{B} \right)^4 \right\} g f_\theta / \Phi \quad (4.7)$$

e

$$\Phi = \left\{ 1 + 1,464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1,65} \right\}^{0,5} \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$\Phi = \left\{ 1 + 1,464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1,65} \right\}^{0,5} \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

$$M_1 = 1,13 - 0,09 \left( \frac{a}{c} \right) \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$M_1 = \left( \frac{c}{a} \right)^{0,5} \left\{ 1 + 0,04 \left( \frac{c}{a} \right) \right\} \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

$$M_2 = \frac{0,89}{\left\{ 0,2 + \left( \frac{a}{c} \right) \right\}} - 0,54 \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$M_2 = 0,2 \left( \frac{c}{a} \right)^4 \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

$$M_3 = \frac{0,5-1}{\left\{ 0,65 + \left( \frac{a}{c} \right) \right\}} + 14 \left( 1 - \left( \frac{a}{c} \right) \right)^{24} \quad \text{para } \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$M_3 = -0,11 \left( \frac{c}{a} \right)^4 \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

$$g = 1 + \left\{ 0,1 + 0,35 \left( \frac{a}{B} \right)^2 \right\} (1 - \sin \theta)^2 \quad \text{para } \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$g = 1 + \left\{ 0,1 + 0,35 \left( \frac{c}{a} \right) \left( \frac{a}{B} \right) \right\}^2 (1 - \sin \theta)^2 \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

$$f_\theta = \left\{ \left( \frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \right\}^{0,25} \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$f_\theta = \left\{ \left( \frac{c}{a} \right)^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right\}^{0,25} \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

No caso dos defeitos interiores com forma semi-elíptica, planar, em placas, submetido a um carregamento do tipo membrana, as equações para o cálculo de  $\Delta K$  são:

$$f_w = \left\{ \sec \left( \left( \frac{\pi c}{W} \right) \left( \frac{2a}{B'} \right)^{0,5} \right) \right\}^{0,5} \quad (4.8)$$

As condições do carregamento são do tipo membrana se

$$0 \leq \frac{a}{2c} \leq 1; \frac{2c}{W} < 0,5; -\pi \leq \theta \leq \pi;$$

e

$$\frac{a}{B'} < 0,625 \left( \frac{a}{c} + 0,6 \right) \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,1$$

ou

$$\frac{a}{B'} < 0,5$$

$$\text{para } 0,1 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

para uma espessura efectiva de  $B' = 2a + 2p$

onde

$$M_m = \left\{ M_1 + M_2 \left( \frac{2a}{B'} \right)^2 + M_3 \left( \frac{2a}{B'} \right)^4 \right\} g f_\theta / \Phi \quad (4.9)$$

e

$$\Phi = \left\{ 1 + 1,464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1,65} \right\}^{0,5} \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$\Phi = \left\{ 1 + 1,464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1,65} \right\}^{0,5} \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

$$M_1 = 1 \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$M_1 = \left( \frac{c}{a} \right)^{0,5} \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

$$M_2 = \frac{0,05}{0,11 + \left( \frac{a}{c} \right)^{1,5}}$$

$$M_3 = \frac{0,29}{0,23 + \left( \frac{a}{c} \right)^{1,5}}$$

$$g = 1 - \left[ \frac{\left( \left( \frac{2a}{B'} \right)^4 \left\{ 2,6 - \left( \frac{4a}{B'} \right) \right\}^{0,5} \right)}{1 + 4 \left( \frac{a}{c} \right)} \right] |\cos \theta|$$

$$f_\theta = \left\{ \left( \frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \right\}^{0,25} \quad \text{para } 0 \leq \frac{a}{2c} \leq 0,5$$

$$f_\theta = \left\{ \left( \frac{c}{a} \right)^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right\}^{0,25} \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{a}{2c} \leq 1$$

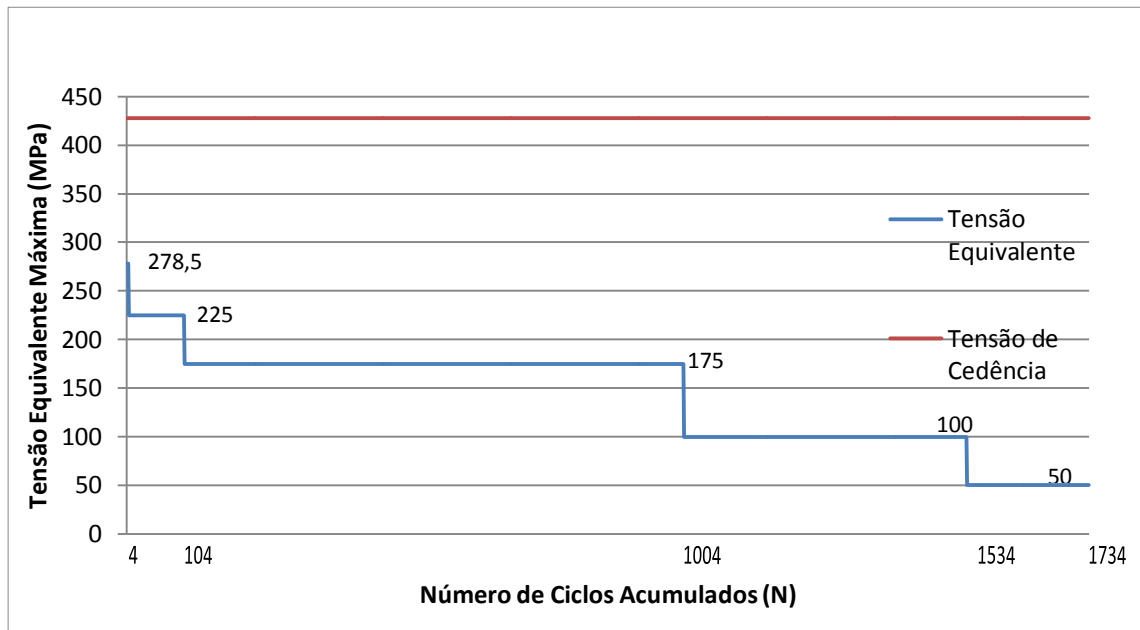
#### 4.3.4 Previsão do limite de vida à Fadiga

Com as equações acima indicadas é possível obter o valor do factor de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , para cada tipo de defeito e a Lei de Paris pode facilmente ser integrada, de modo a se calcular o número de ciclos de fadiga até o poro inicialmente considerado atingir metade da espessura do componente (dimensão crítica que implica a retirada do componente de serviço).

Para facilitar os cálculos, foram realizadas duas rotinas de cálculo no programa MatLab, uma para cada tipo de defeito, onde foram inseridas as equações para o cálculo de  $\Delta K$ , juntamente com a condição limite do defeito e o valor de incremento de crescimento de fenda foi obtido ciclo a ciclo, isto é,  $af$ , é obtido da equação 4.10:

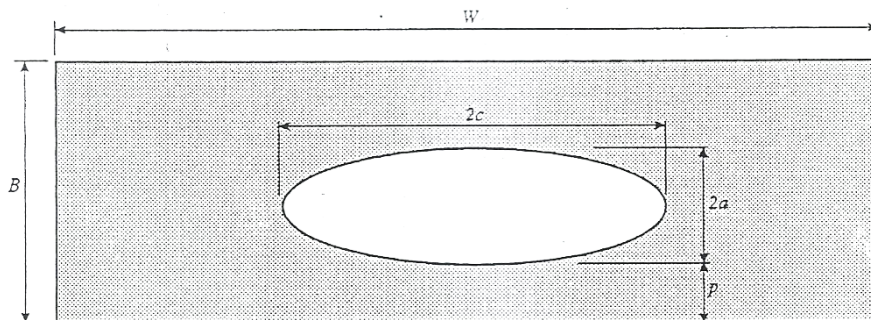
$$af = C. (\Delta K)^m . N + ai \quad (4.10)$$

Os valores das tensões utilizadas nas duas rotinas de cálculo para obtenção do valor de  $\Delta K$ , correspondem as amplitudes máximas de tensões locais medidas pela roseta 6, representada em [1] obtidas através do método de Rainflow. Foi feita uma simplificação do diagrama existente no documento [1] obtendo-se o seguinte diagrama simplificado (figura 4.6), que contém os carregamentos mais significativos durante um viagem de ida e de volta (1 dia),.

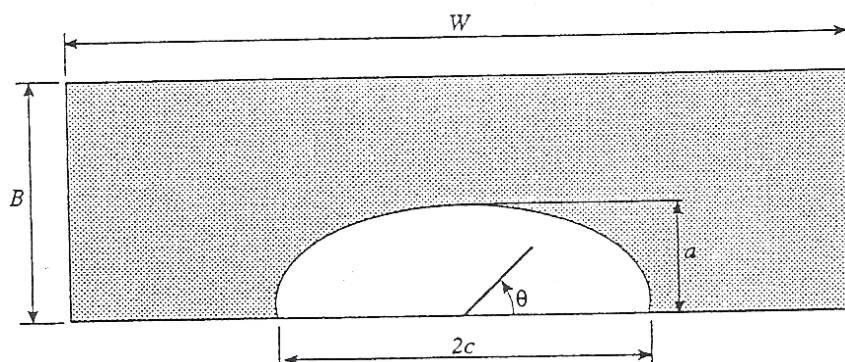


**Figura 4.6 Diagrama de Tensões Equivalentes vs Número de Ciclos de Fadiga Acumulados.**

Uma vez que o projecto de norma PD 6493:1997 [18] considera os poros com forma semi-elíptica, foram determinados os valores de comprimento  $2c$  e largura  $2a$  (Fig. 4.7 e 4.8), para os poros de maiores dimensões encontrados na observação óptica (Capítulo 3, 3.3 e 3.4), para serem inseridos na rotina de cálculo criada em Matlab.

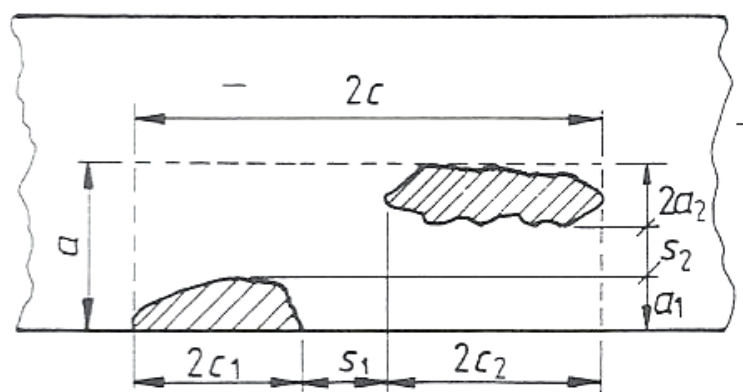


**Figura 4.7 Geometria para defeitos interiores. [18]**

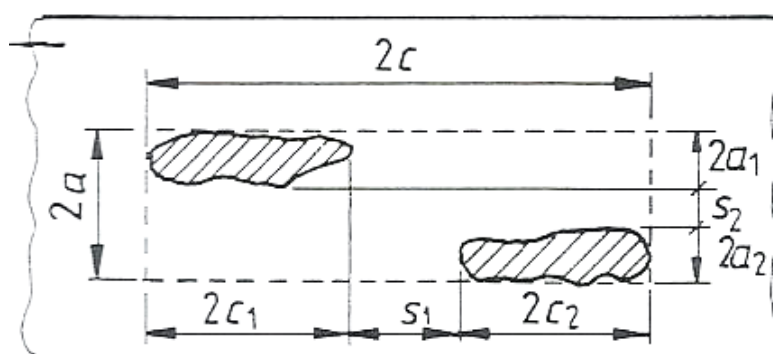


**Figura 4.8 Geometria para defeitos à superfície. [18]**

No caso dos poros obtidos por tomografia (figura 3.11), e devido à sua proximidade, a referência [18] sugere que estes sejam considerados com um único poro, obtendo valores de comprimento  $2c$  e largura  $2a$ , como indicado na figura 4.9 e 4.10.

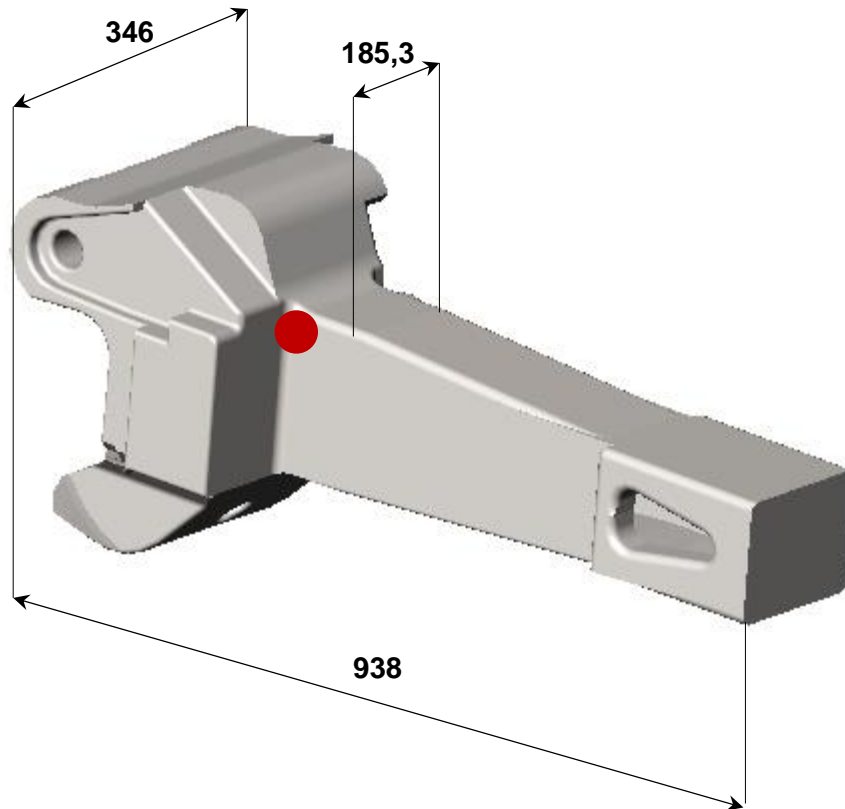


**Figura 4.9. Geometria para defeitos coplanares à superfície**  
**defeitos e interiores [18]**



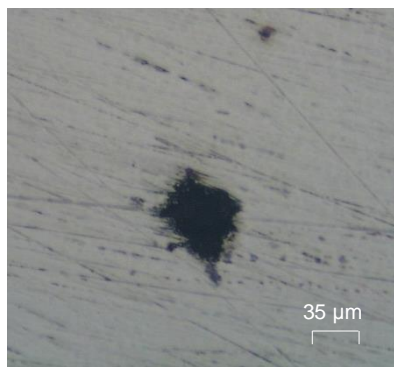
**Figura 4.10. Geometria para defeitos coplanares interiores [18]**

O valor da espessura,  $B$ , utilizado na rotina de cálculo corresponde a espessura do “engate” na zona crítica - correspondente a 12 mm - e a largura utilizada,  $W$ , foi de 183,5 mm como indicado Figura 4.11.

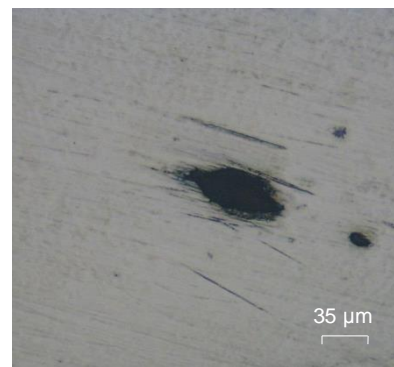


**Figura 4.11** Medidas reais do “engate” em mm e posição da roseta 6 (zona crítica) a vermelho.

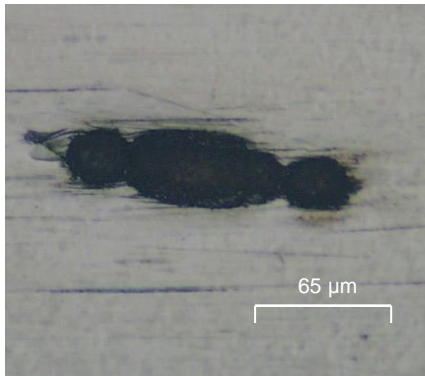
Simultaneamente, foram escolhidos três dos poros com maiores dimensões observados por microscópico e os dois observados por tomografia, numa tentativa de perceber e quantificar a longevidade do componente, tentando perceber o efeito das diferentes dimensões dos defeitos na vida à fadiga do componente. Nas figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 e na tabela 4.1 estão representados os respectivos poros bem com as medidas de  $a$  e  $c$  para cada um deles.



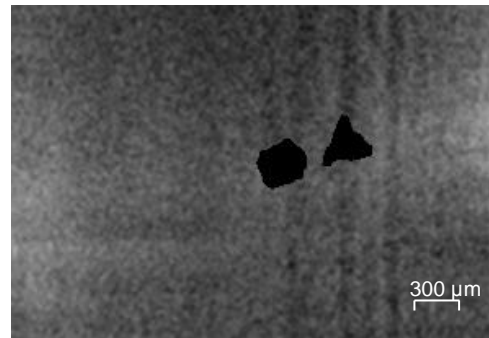
**Figura 4.12** Poro A (Observação óptica).



**Figura 4.13** Poro B (Observação óptica).



**Figura 4.14 Poro E (Observação Óptica)**



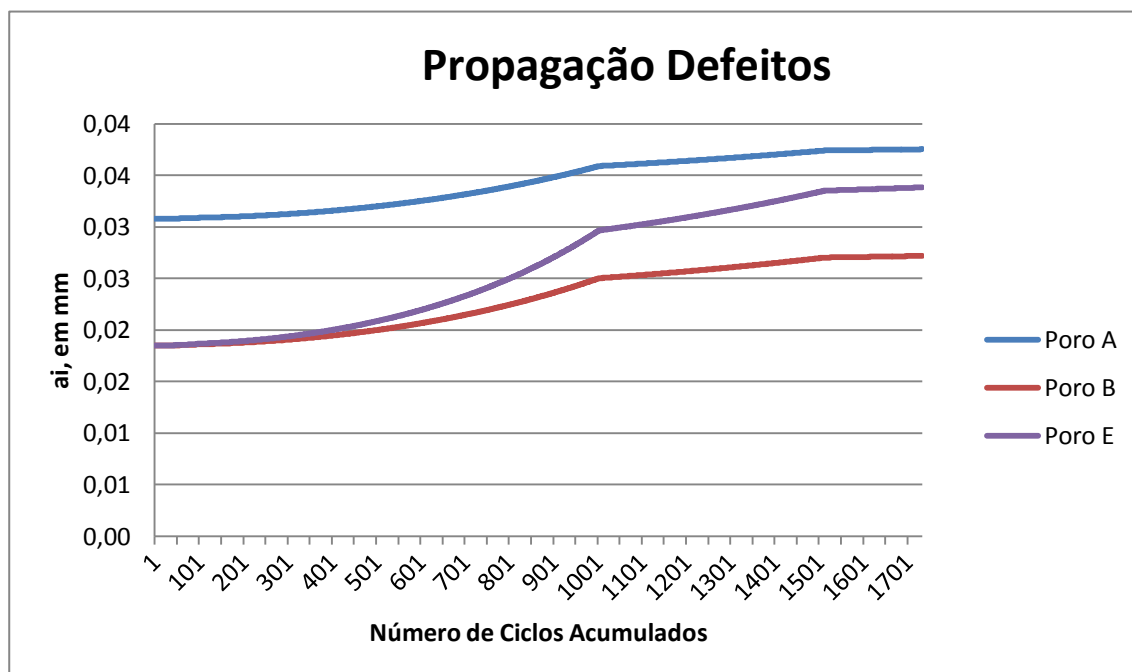
**Figura 4.15. Poro CD (Observação tomográfica).**

	Poro A	Poro B	Poro CD	Poro E
<b>2a</b>	0,0616	0,037	0,449	0,037
<b>2c</b>	0,0562	0,0686	0,705	0,13
<b>a</b>	0,0308	0,0185	0,225	0,0185
<b>c</b>	0,0281	0,0343	0,353	0,065
<b>a/2c</b>	0,0548	0,0270	0,319	0,14

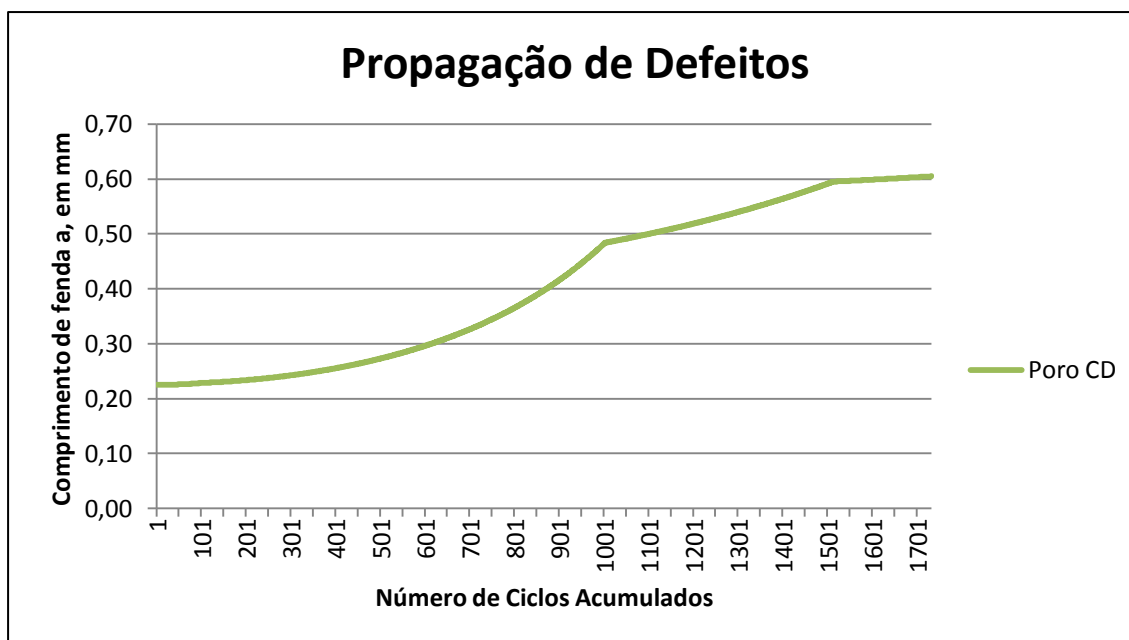
**Tabela 4.1. Comprimento, largura e factor de forma de cada poro. (medidas em mm).**

As medidas acima representadas apresentam coerência entre as classes de áreas encontradas e representadas na figura 3.8.

Uma vez inseridos os tamanhos dos poros na rotina de cálculo obteve-se para o poro A, B, CD e E os seguintes gráficos que mostram os diferentes patamares de carregamento e a evolução da fenda ao longo de um dia de serviço.

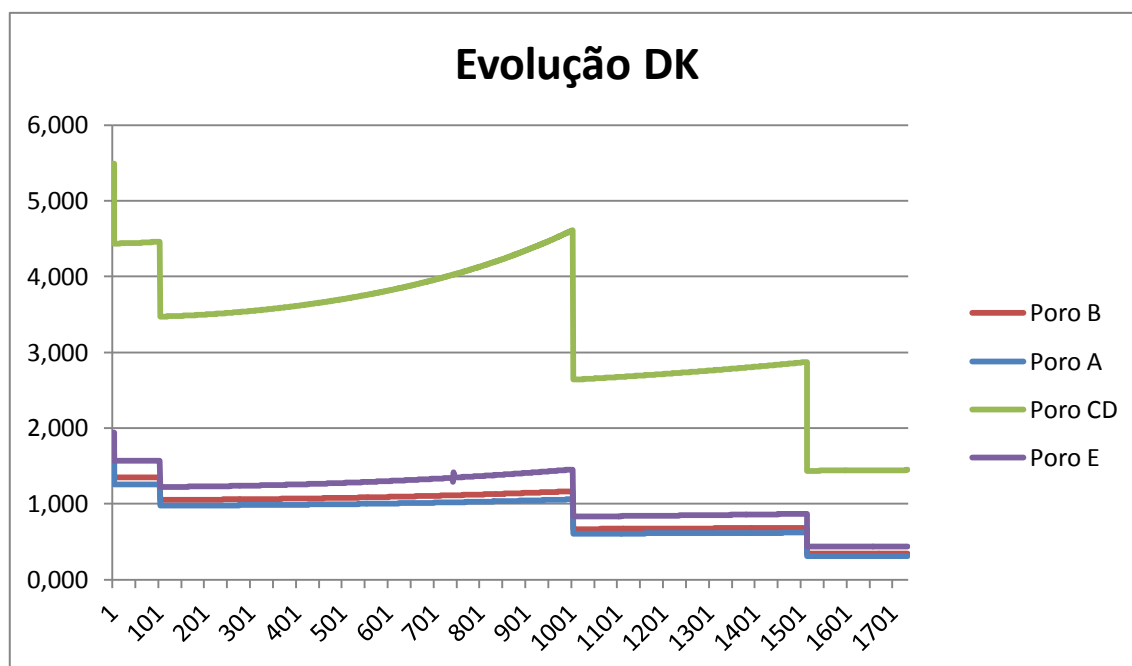


**Figura 4.16. Propagação do tamanho, a, dos poros “A, B, E”, ao longo de um dia assumindo que todos os patamares de carregamento induzem  $\Delta K$  superior a  $4.7 \text{ MPa} \sqrt{m}$  (valor limiar de propagação)**



**Figura 4.17. Propagação do tamanho, a, do poro “CD” ao longo de um dia assumindo que todos os patamares de carregamento induzem têm  $\Delta K$  superior a  $4.7 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ . (valor limiar de propagação)**

Contudo os poros não propagarão em todos os patamares de carregamento, como ilustrado acima, uma vez que os valores de  $\Delta K$  não são sempre superiores ao valor limiar de propagação de  $4.7 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$  ao longo do tempo (Figura 4.18). No gráfico abaixo está representada a evolução dos valores de  $\Delta K$  para um dia de serviço e, como se pode constatar, poros com dimensões de profundidade de defeito, a, inferiores a 0,2 mm (poros A, B e E) não se irão propagar e o único bloco de carregamento com relevância é o primeiro bloco de carregamento, para o poro CD; todos os outros não produzem, numa fase inicial, qualquer efeito no que diz respeito a propagação de fenda uma vez que o valor de  $\Delta K$  é inferior ao  $\Delta K_{th}$ .



**Figura 4.18. Evolução do  $\Delta K$  ao longo dos diferentes patamares de carregamento para as diferentes dimensões dos poros.**



Assim sendo, foi realizado outro cálculo, utilizando um único bloco de carregamento, para o poro CD, com uma tensão máxima de 278,5 MPa (valor medido através de extensometria e indicado na figura 4.6), com o objectivo é o de estimar o tempo crítico de funcionamento, isto é, altura em que o poro atinge metade da espessura da zona crítica, zona assinalada a vermelho na imagem 4.11, obtendo assim os gráficos abaixo representados para cada tipo de defeito.

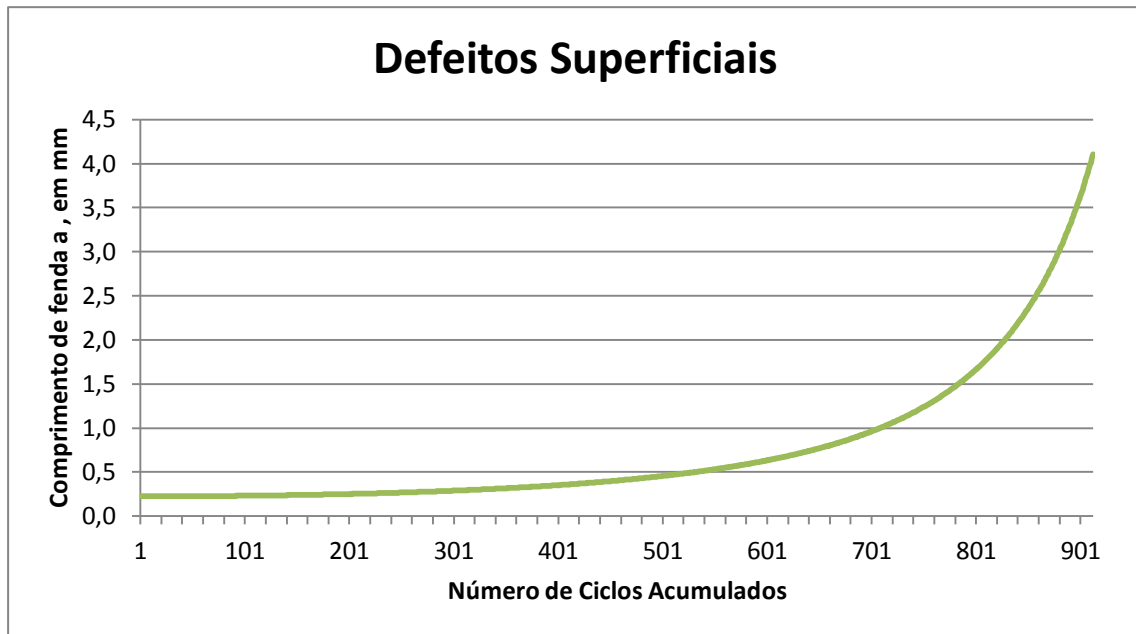


Figura 4.19. Propagação do comprimento de fenda para poro CD assumindo que ambos estão à superfície do componente.

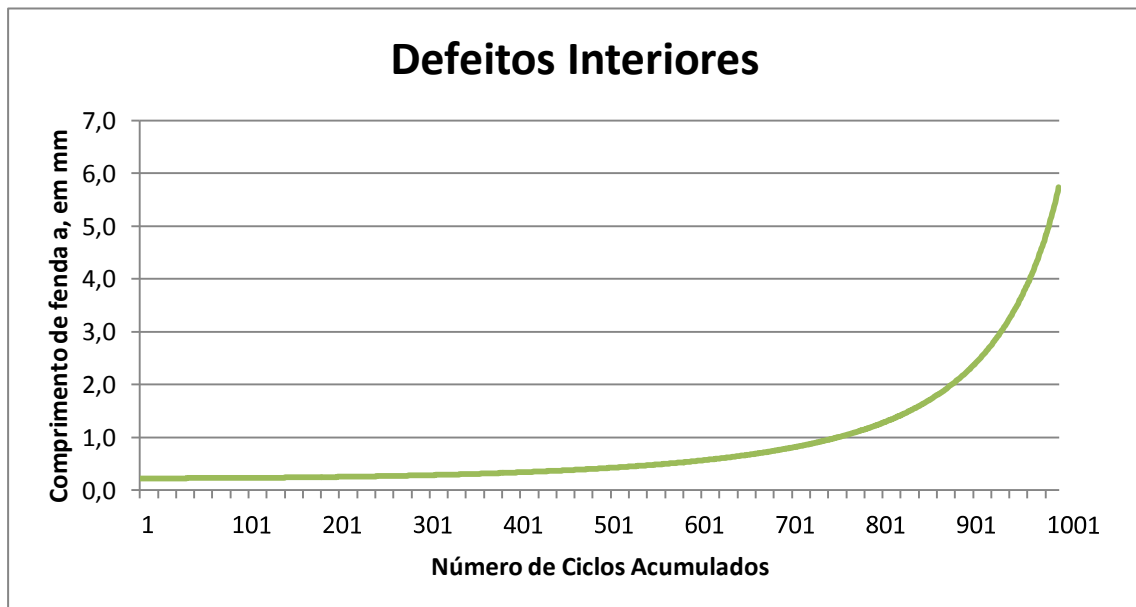


Figura 4.20. Propagação do comprimento de fenda para poro CD assumindo que ambos estão no interior do componente.

Os resultados dos gráficos estão ilustrados na tabela abaixo onde está representado o número de ciclos acumulados e a duração em meses correspondente para cada tipo de defeito.

Tipo de Defeito	Poro CD	
	Superficial	Interior
Número de Ciclos Acumulados (N)	946	1019
Duração (Meses)	9	10

**Tabela 4.2. Previsão de vida à fadiga, em meses, para poro CD admitindo o defeito como superficial e embebido.**

## **Capítulo 5 – Simulação Numérica**

### **5.1 Introdução**

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é, hoje em dia, bastante utilizado como ferramenta de auxílio dos engenheiros na criação de novos produtos, cada vez mais complexos e sujeitos a normas de segurança e fiabilidade muito restritas, por exemplo no cálculo estrutural.

O método dos elementos finitos tornou-se um dos métodos mais comuns para resolver problemas de carácter estático ou dinâmico, em regime linear ou não linear, para uma, duas ou três dimensões, podendo também ser adaptado para o uso em ambientes heterogéneos e para formas bastante complexas [21].

### **5.2 Caracterização da geometria em estudo**

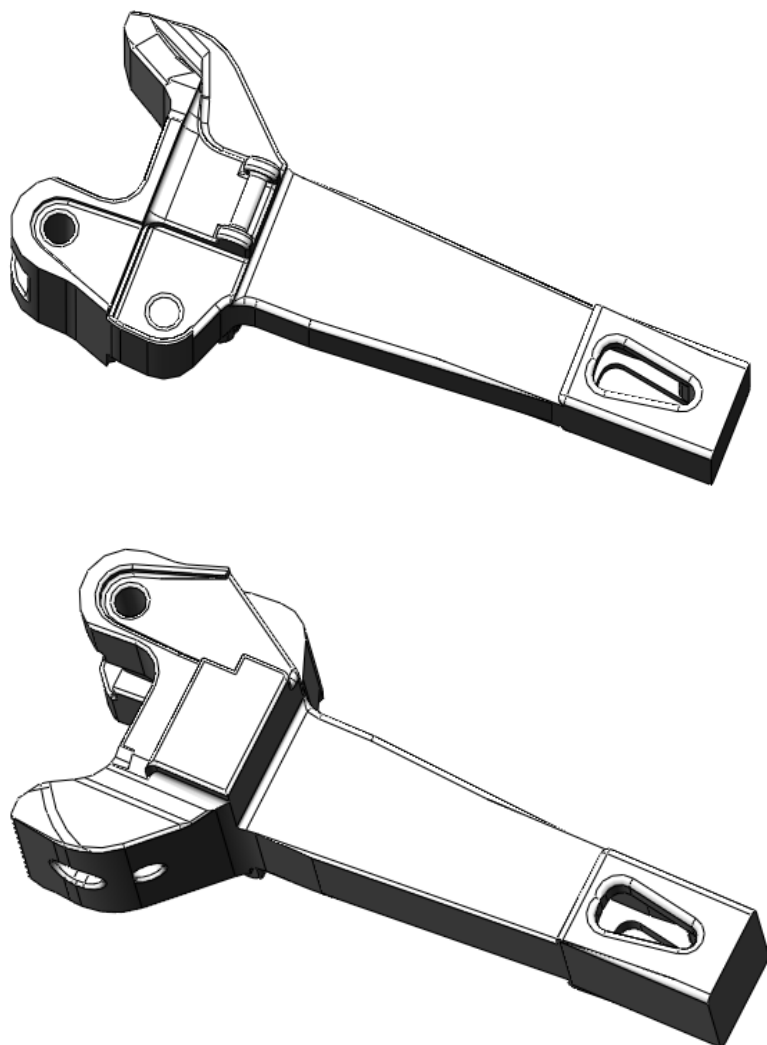
Para simular o comportamento mecânico do componente, recorreu-se aos programas *SolidWorks Simulation* e ao *ANSYS Workbench*. Para tal foi necessário modelar o componente em 3D, representado na Figura 5.1, concebido no *SolidWorks*.

A análise foi efectuada admitindo um comportamento linear elástico isotrópico para o material, sendo que as características do material foram inseridas como especificado para um aço ASTM A148 90-60, ou seja, coeficiente de Poisson de 0,3, Módulo de Young de 207 GPa, tensão de cedência de 427,7 MPa e tensão de rotura de 659,6 MPa valores dentro dos valores apresentados na bibliografia [3].

### **5.3 Escolha dos elementos**

A criação de malhas é um dos aspectos mais críticos nas simulações em engenharia. Demasiados elementos podem levar a um tratamento de dados muito demorado, assim como um número reduzido de elementos pode levar a resultados imprecisos.

Para cada tipo de projecto existem abordagens diferentes no que diz respeito à criação de malhas. A malhagem em *SolidWorks Simulation* foi feita através de elementos finitos de tipo sólidos tetraédricos, com elementos de primeira ordem ('Draft elements') ou elementos de segunda ordem ('High quality elements') [22]. A operação de malhagem através do ANSYS foi feita com elementos de tipo sólido e o programa possui uma configuração de preferência física que assegura a correcta malhagem para cada simulação.[23]



**Figura 5.1** Desenhos 3D do “engate”.

#### ***5.4 Condições de Fronteira***

Para uma correcta simulação de um problema estrutural em elementos finitos, não basta uma modelação realista e uma malha de elementos finitos adequada, mas as condições de fronteira e a aplicação dos carregamentos tem que corresponder o melhor possível às solicitações reais em serviço.

Na figura 5.2 está representado o modelo do “engate” e as respectivas condições de fronteira e carregamento aplicadas durante as simulações numéricas. Na extremidade mais a ré do “engate” foi simulado um encastramento e na extremidade oposta, designada cabeça do “engate”, foi aplicada uma pressão para simular o esforço axial a que a peça é sujeita. O valor

da pressão, igual a 28,6 MPa, foi calculado dividindo a força máxima calculada, aplicada a cada vagão, pela área onde foi aplicada a força. Tendo em consideração os dados referidos em [1], o peso de cada vagão corresponde a aproximadamente 94 toneladas, considerando que o comboio transporta 22 vagões e 2 locomotivas, com um peso total de 2154 toneladas.

Uma vez que o esforço de flexão é desprezável [20], foi adicionada uma condição que impede o deslocamento segundo o plano Z nas duas faces indicadas, usando o referencial presente na figura 5.2, de forma a ter um momento flector nulo no encastramento.

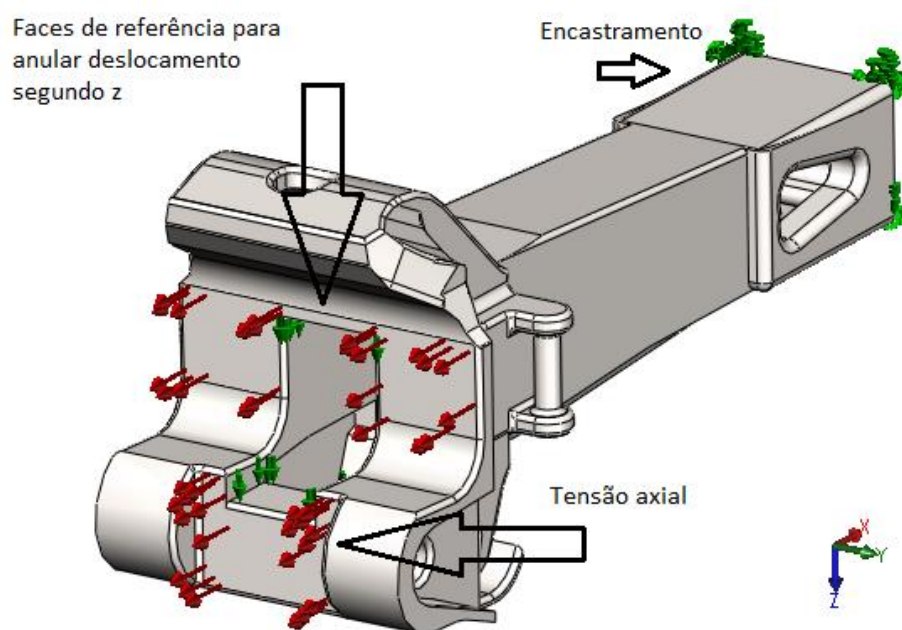
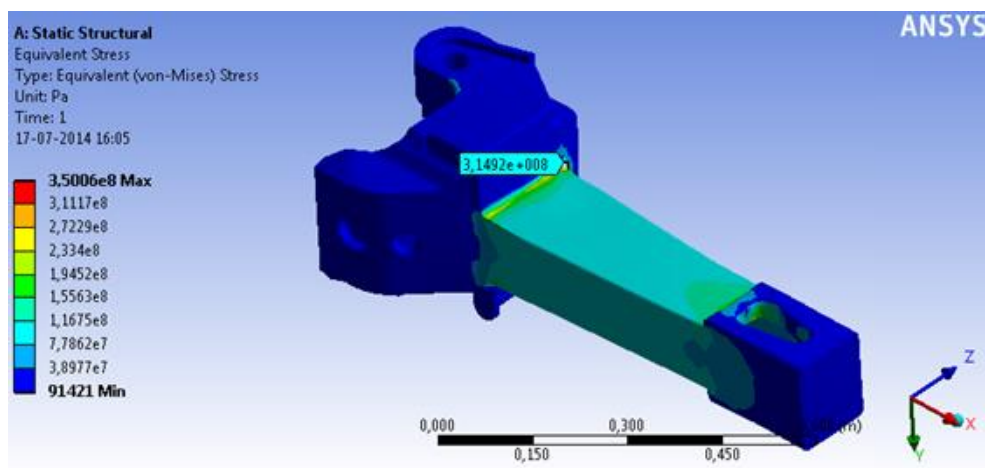


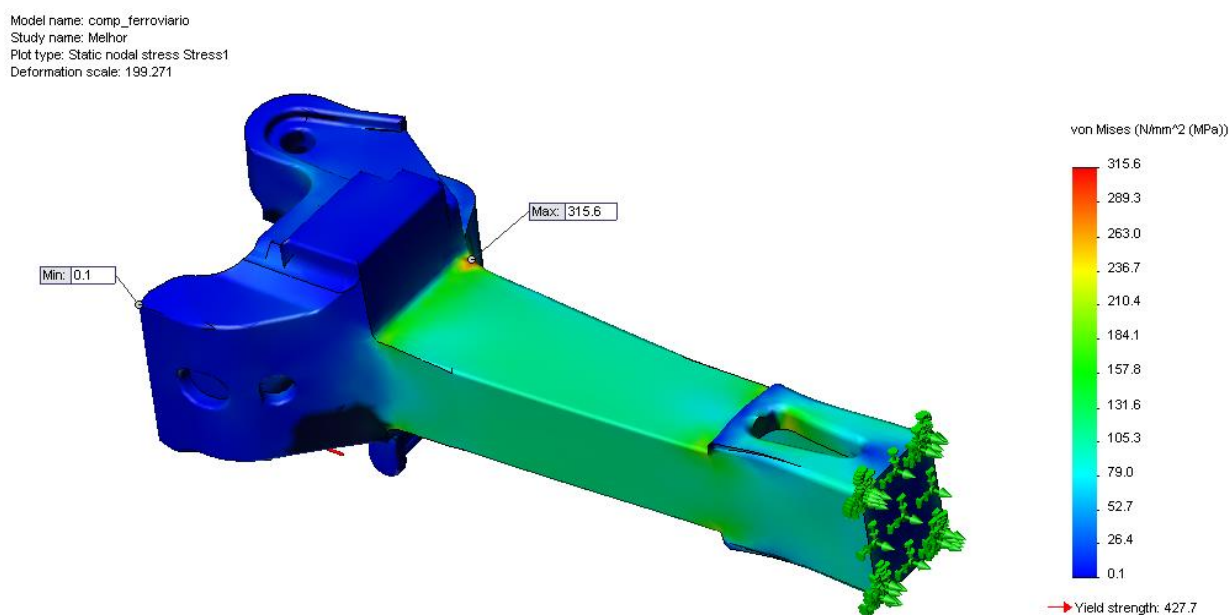
Figura 5.2. Esquema das condições fronteira e de carregamento.

### 5.5 Resultados Obtidos na Análise de Tensões

Os resultados da distribuição das tensões de Von Mises estão ilustrados nas Figuras 5.3 e 5.4, resultados do ANSYS Workbench e do *SolidWorks Simulation* respectivamente.



**Figura 5.3. Distribuição das tensões de Von Mises no programa *ANSYS Workbench*.**



**Figura 5.4. Distribuição das tensões de Von Mises no programa *SolidWorks Simulation*.**

Os resultados estão coerentes entre si (314,92 MPa e 315,6 MPa) e com os dados obtidos em serviço pela roseta 6, onde os valores de pico chegaram aos 307 MPa [1][19]. Estes valores andam muito perto dos resultados obtidos tanto pelo *SolidWorks Simulation* como no *ANSYS WorkBench*.

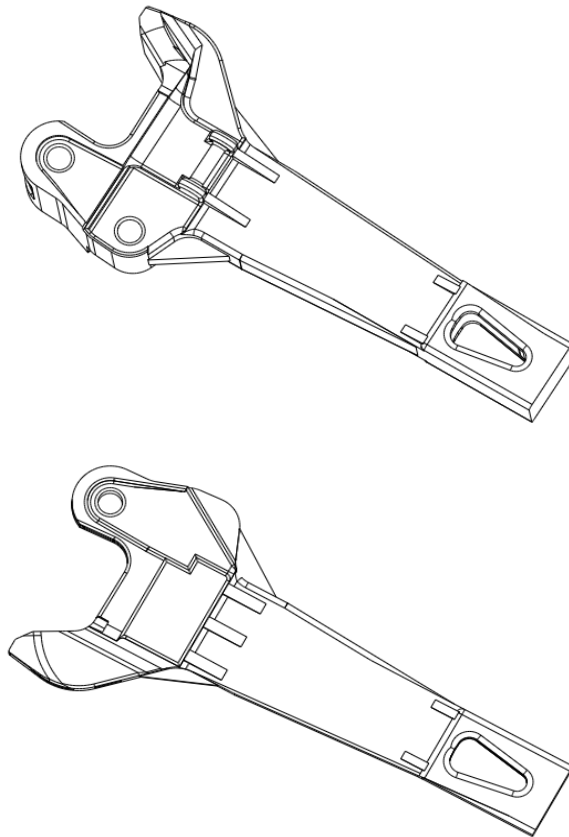
No quadro abaixo estão apresentados os valores obtidos para as tensões e os erros associados tendo em conta os dados obtidos em serviços e nas duas simulações realizadas.

	<i>SolidWorks Simulation</i>	<i>ANSYS WorkBench</i>
Tensões de Von Mises (MPa)	315.6	314.92
Erro (%)	2.8	2.6

**Tabela 5.1. Resultado das tensões de Von Mises no ponto onde ocorreu a fissuração, para os dois programas de simulação, e comparação o valor experimental determinado em [1].**

### ***5.6 Sugestão de melhoramento para a diminuição das tensões provocadas pelos esforços em serviço***

Com os dados obtidos no capítulo 4, chegou-se à conclusão de que para uma tensão equivalente de 225 MPa (Figuras 4.6 e 4.18) não se daria a propagação de fenda, para poros na classe de tamanhos analisados, uma vez que o  $\Delta K$  seria menor que  $\Delta K_{th}$  de  $4.7 MPa\sqrt{m}$ , como já referido. Assim sendo, foram feitas alterações no desenho do engate (Fig. 5.5) com o propósito de reduzir as tensões máximas para um valor menor que 225 MPa obtendo assim, do ponto de vista teórico, um período de vida à fadiga infinito.



**Figura 5.5. Desenhos 3D do “engate” melhorado.**

Nas figuras 5.6 e 5.7 encontra-se representado a distribuição de tensões de Von Mises para o “engate”, com as respectivas modificações, que, como se pode comprovar, encontram-se abaixo dos 225 MPa para as mesmas condições fronteira das simulações realizadas para “engate” original.

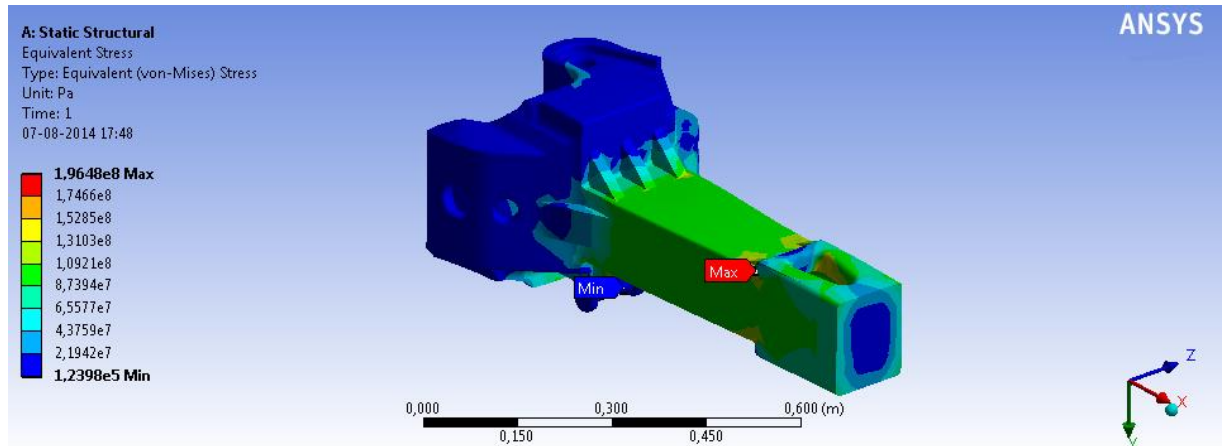


Figura 5.6. Distribuição das tensões de Von Mises para “engate” melhorado no ANSYS Workbench

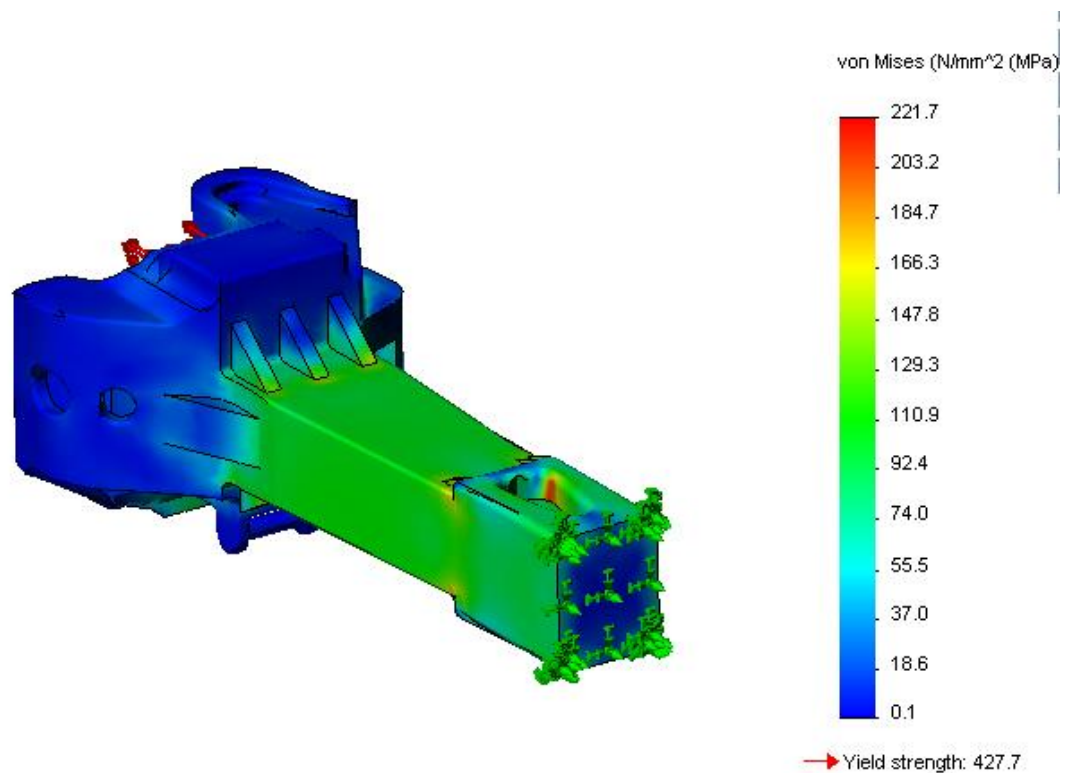
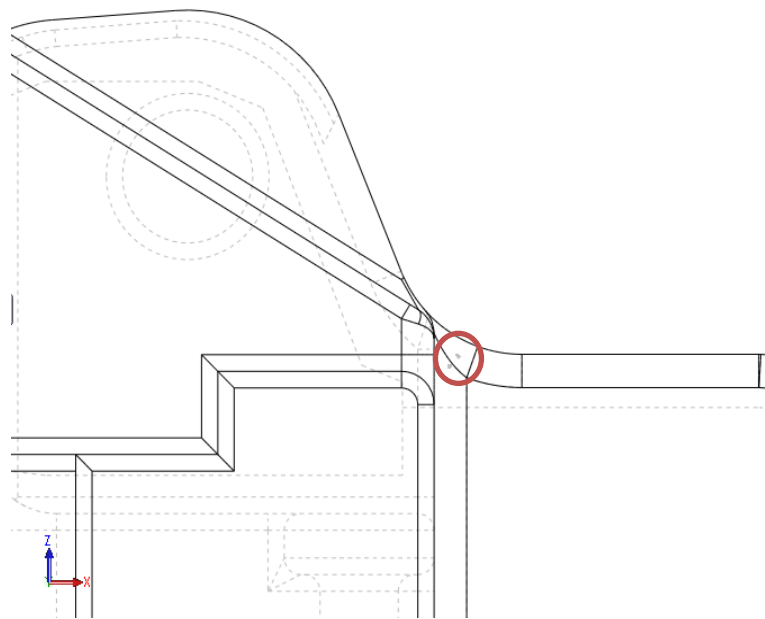


Figura 5.7. Distribuição das tensões de Von Mises para “engate” melhorado no SolidWorks Simulation

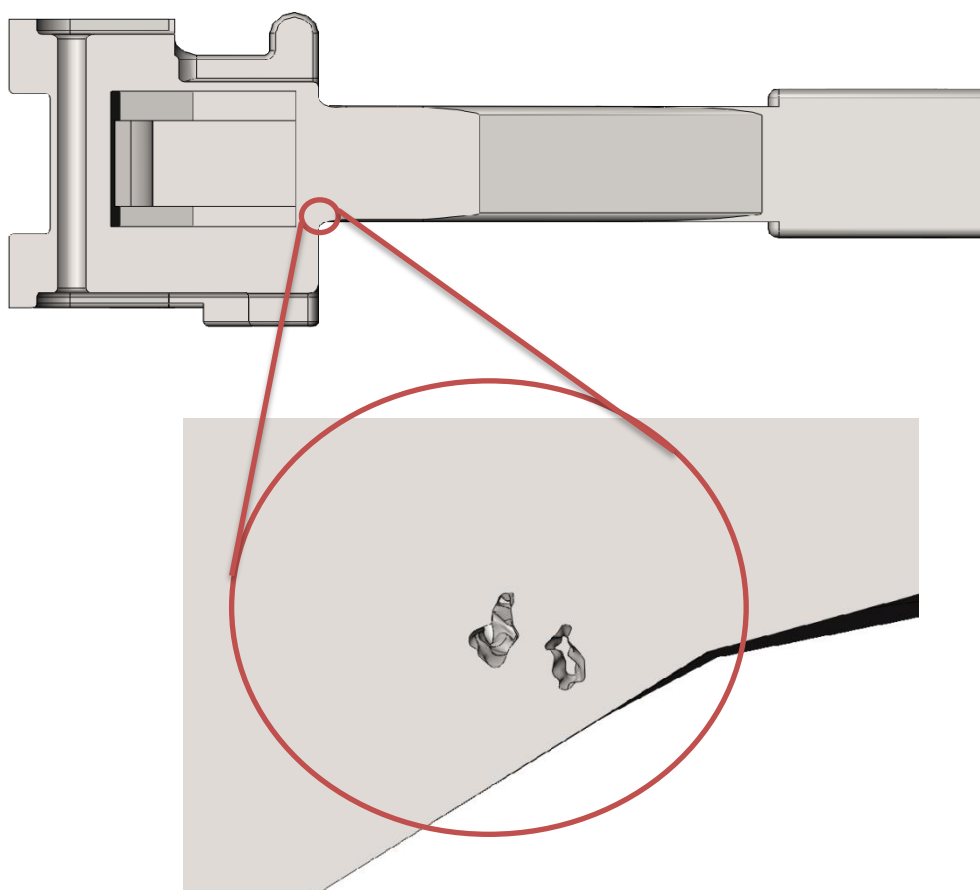


### **5.7 Efeito das Porosidades na Concentração de Tensões**

De modo a simular o efeito dos poros na concentração de tensões do componente, foram inseridos os poros encontrados por tomografia e reconstruídos no SolidWorks Simulation no componente sob estudo (Fig3.15). Estes foram colocados em duas localizações diferentes, junto da zona crítica do componente, como representado na Figura 5.8 e 5.9.



**Figura 5.8. Ilustração das localizações dos poros para simulação numérica.**



**Figura 5.9. Corte transversal do componente evidenciando localização dos poros.**

Devido à complexidade da forma das porosidades e/ou poder computacional insuficiente, não foi possível criar uma malha de envolvimento dos poros o que impossibilitou a análise por elementos finitos do componente com defeitos no seu interior.

Seria de grande interesse dar continuidade a este trabalho começando exactamente por uma análise através de elementos finitos de componentes reais com defeitos no seu interior procurando perceber como estes afectam as tensões locais nos mesmos.

## Capítulo 6 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Este trabalho pretendeu contribuir para o reforço do conhecimento relativamente às metodologias de estudo na integridade estrutural de um componente ferroviário, mais precisamente no efeito e causa de porosidades inevitavelmente presentes em componentes vazados.

Conforme o inicialmente proposto, a presente dissertação continha várias hipóteses, discutidas ao longo dos vários capítulos, conduzindo às seguintes conclusões:

- Da análise óptica, comprova-se o bom estado da peça obtida por fundição; contudo, este resultado não pode ser extrapolado para a realidade devido as grandes diferenças na geometria do engate e das amostras estudadas.
- Da análise tomográfica pode-se concluir que o método não seria eficaz no controlo de qualidade devido às limitações dos tamanhos das amostras e à densidade do material; contudo, o resultado sobre a geometria dos poros é bastante significativo, comprovando a complexidade na forma dos mesmos.
- Na previsão à fadiga, os resultados relativos à disfunção foram aproximadamente iguais a um ano, tendo sido semelhantes aos piores registados em serviço. Com base neste valor calculado para a vida de fadiga, os intervalos entre inspecções passaram a ser igual a 12 meses. Simultaneamente, alguns engates mostram dimensões de defeitos inferiores às estimadas, sendo que esses resultados podem ser explicados pelos seguintes aspectos:
  - ✓ Alteração dos perfis do percurso
  - ✓ Alteração na posição do engate no comboio
  - ✓ Alterações nas cargas dos vagões
  - ✓ Utilização da curva de projecto de 50% de fiabilidade
  - ✓ Possibilidade do projecto de norma PD 6493 ser muito conservadora
- Comprova-se, apesar do número reduzido da amostra, que os poros com formas geométricas mais longas têm um efeito mais nocivo que os poros esféricos e que os poros superficiais se propagam mais rapidamente do que os embebidos.
- Verifica-se a ligação existente entre o tamanho dos poros e a diminuição acentuada de vida à fadiga.

- Constatou-se pelo MEF que a zona crítica se encontra na zona de concordância entre a cabeça e o componente e a sua tensão máxima não excede a tensão de cedência não ultrapassando os 316 MPa.
- A distribuição de tensões pelo MEF, no engate, apresenta valores compatíveis com os valores determinados em serviço com os extensómetros.
- Alterou-se a geometria do componente, com o propósito da redução das tensões residuais, com resultados bastante satisfatórios, contribuindo para uma vida teórica à fadiga infinita, com apenas um aumento de 3 kg no peso do engate.
- Resultados inconclusivos no que diz respeito ao efeitos das porosidades na concentração de tensões no “engate”, uma vez que devido à complexidade da geometria e/ou poder computacional insuficiente não se conseguiu o malhar os defeitos com êxito.

## ***6.2 Propostas para Trabalhos Futuros***

No que diz respeito a melhorias e propostas para trabalhos futuros o autor identificou os seguintes pontos:

- Análise da distribuição de defeitos num componente real e consequente simulação numérica com o propósito de avaliar a influência que as diferentes distribuições têm na concentração de tensões.
- Obtenção de soluções numéricas por elementos finitos de propagação de fenda em componentes complexos.

## Bibliografia

- 1] T. L. Morgado, Integridade Estrutural de um Componente Rodoviário (Tese Doutorado), Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico , 2009.
- 2] ASM International, ASM Handbook: Properties and Selection: Iron, Steel and High-Performance Alloys, vol. 1, 2002.
- 3] ASTM, “ASTM A148/A148M - 08 Standard Specification for Steel Castings, High Strength, for Structural Purposes”.
- 4] I. Manufacturers Standardization Society for the Valve and Fittings Industries, Visual Method for Evaluation of Surface Irregularities, Virginia, 2001.
- 5] L. R. N. C. Maia, O Transporte Ferroviário de Mercadorias: O caso Europeu, Porto: FEUP, 2008.
- 6] S. M. z. Noughabi, “Failure Analysis of automatic coupler SA-3 in railway carriages,” *Elsevier*, 2007.
- 7] N. Vanderesse, “Microtomographic study and finite element analysis of the porosity harmfulness in a cast aluminium alloy,” *International Journal of Fatigue*, 2011. .
- 8] G. Nicoletto, “Characteriation of microshrinkage casting defects of Al-Si alloys by X-Ray computed tomography and metallography,” *International Journal of Fatigue*, 2011
- 9] Y. Tijani, “Quantitative evaluation of fatigue life of cast aluminum alloys by non-destructive testing and parameter model,” *International Journal of Fatigue*, 2013.
- 10] “<http://www.vesuvius.com>,” [website online e consultado em 15/07/2014].
- 11] ASM International, ASM Handbook: Failure Analysis and Prevention, vol. 11, 2002.
- 12] T. M. Buzug, Computed Tomography, Germany: Springer, 2008.
- 13] C. A. G. d. M. Branco, Mecânica dos Materiais, 3ª ed., Fundação Calouste Gulbenkian,

1998.

- 14] ASTM, E3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, 2007.
- 15] ASTM, E 2109 - 01 Test Methods for Determining Area Percentage of Porosity in Thermal Sprayed Coatings.
- 16] Murakami Y, Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. *Int J Fatigue* 1994;16:163–82.
- 17] Dr.ir.P.J.G.Schreurs, Fracture Mechanics, Eindhoven University of Technology, 2011.
- 18] PD 6493, 1997.
- 19] C. V. I. T.L.M.Morgado, “Previsão de vida à Fadiga dos engates (rabetas) dos vagões de transporte de carvão,” *Mecânica Experimental Revista da APAET nº 14*, pp. 35-43, 2007.
- 20] Morgado T. L. M., Branco C. M., Infante V., “Reliability fatigue analysis of Steel Couplings used in railway transport of coal”. *Second International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading Proceedings Book*, editors: C.M. Sonsino, P. C. McKeighan, Darmstadt - Germany, March 23-26, 2009. ISBN 973-3-00-027049-9.
- 21] G. T. E. L. Gouri Dhatt, Finite Element Method, ISTE, 2012.
- 22] P. M. Kurowski, Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2013, Schroff Development Corporation, 2013.
- 23] “<http://www.Ansys.com>,” [Website online e consultado em 2/05/2014].